ISSN　1346 － 7328
国総研資料　第 188 号
平 成　16　年　7 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL　NOTE　of
National　Institute　for　Land　and　Infrastructure　Management

No. 188　　　　　　　　　　　July　 2004

道路橋の交通特性評価手法に関する研究

－　橋梁部材を用いた車両重量計測システム（Bridge Weigh-in-Motion System）　－

玉越　隆史・中洲　啓太・石尾　真理・中谷　昌一

Study on evaluation method of the traffic characteristics on highway bridges
－　Bridge Weigh-in-Motion System －

Takashi TAMAKOSHI, Keita NAKASU, Mari ISHIO, Shoichi NAKATANI

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure and Transport,　Japan

国土技術政策総合研究所資料　　　　　　　　　　Technical Note of NILIM
第188号　　2004年 7月　　　　　　　　　　No.188　July 2004

道路橋の交通特性評価手法に関する研究

－　橋梁部材を用いた車両重量計測システム（Bridge Weigh-in-Motion System）　－

玉越　隆史＊
中洲　啓太＊＊
石尾　真理＊＊＊
中谷　昌一＊＊＊＊

Study on evaluation method of the traffic characteristics on highway bridges
－　Bridge Weigh-in-Motion System －

Takashi TAMAKOSHI
Keita NAKASU
Mari ISHIO
Shoichi NAKATANI

概要

道路橋の設計活荷重は、道路構造令で定める設計自動車荷重に、大型車の通行状況を加味して設定されている。そのため、設計活荷重の検討にあたっては、大型車の通行実態に関するデータを取得し、それらを適切に考慮することが課題となる。

これらをふまえ、国土技術政策総合研究所橋梁研究室では、全国レベルで大型車両の通行実態の傾向を簡易かつ安価に把握するため、橋梁部材のひずみ応答から、通行車両の重量等を測定するシステム（Bridge Weigh-in-Motion）を開発した。

本資料は、橋梁研究室が開発した車両重量計測システムの基本的な原理や特徴を概説した上で、その適用にあたっての留意点を、検証試験のデータとともに示したものである。

キーワード：道路橋、車両重量計測システム、BWIM、活荷重

Synopsis

The design live load employed in specifications for highway bridges has been improved depending on the state of large-sized vehicles since 1886. Therefore, in order to revise the design live load for highway bridges, it is necessary to collect data on actual condition of traffic weight.

NILIM has developed Bridge Weigh-in-Motion system that measures traffic weight easily and economically using strain data of concrete slabs or steel girders.

In this note, fundamental algorithm for weight calculation and application range based on the test results of this system are described.

Key Words : highway bridge, Bridge Weigh-in-Motion system, live load

---

* 橋梁研究室室長

** 橋梁研究室研究官

*** 橋梁研究室研究員

**** 元橋梁研究室室長

現在：国土交通省　道路局　国道防災課　道路保全企画官

* Head, Bridge Division, Road Department, NILIM

** Researcher, Bridge Division,Road Department,NILIM

*** Research Engineer, Bridge Division, Road Department, NILIM

**** Director for Road Management, National Highway and Risk Management Division, Road Bureau

まえがき

我が国の道路橋設計で用いられている自動車荷重に関する技術基準は、1886（明治 19）年に制定された「国県道の築造標準」の中に規定されて以来、自動車交通の増大や大型化に対応して、逐次見直されてきた。そして、現在の道路橋の設計活荷重は、道路構造令に定める設計自動車荷重に大型車の通行状況を加味して設定され、道路橋示方書にとりまとめられている。

最近では、道路橋の設計基準を部分安全係数設計法の書式に改訂する作業が進められており、設計活荷重に関する検討のため、大型車の交通実態に関する最新のデータを取得していくことが必要とされている。

これらをふまえ、国土技術政策総合研究所橋梁研究室では、供用中の橋梁部材のひずみ応答から、通行車両の重量等を簡易に測定するシステム（Bridge Weigh-in-Motion, 以下、「当システム」という。）を開発した。

本資料は、当システムの基本的な原理や特徴を概説した上で、その適用条件など取り扱い上の留意点を検証試験の結果とともに示したものである。

目　次

まえがき

1章.　通行車両の計測手法……………………………………………………………1
　1.1　概要………………………………………………………………………… 1
　1.2　橋梁部材の応答特性と車両重量計測…………………………………… 3
　　1.2.1　橋梁部材の応答特性………………………………………………… 3
　　1.2.2　通行中の大型車が路面に及ぼす動的荷重…………………………12
　　1.2.3　応答時間の短い部材を用いた車両重量計測手法…………………14
　　1.2.4　応答時間の長い部材を用いた車両重量計測手法…………………17

2章.　ＢＷＩＭの内容……………………………………………………………… 18
　2.1　システムの開発目標 …………………………………………………… 18
　2.2　システムの基本構成と算定の流れ………………………………………19
　2.3　車軸の検知 ……………………………………………………………… 21
　2.4　車両の分離（軸数の判別） …………………………………………… 23
　2.5　車両重量の算出 ………………………………………………………… 32
　2.6　各種の処理 ……………………………………………………………… 35
　　　2.6.1　ノイズの処理…………………………………………………………35
　　　2.6.2　温度変化に対する処理………………………………………………36
　　　2.6.3　タンデム軸の処理……………………………………………………37
　　　2.6.4　低速走行車両の処理…………………………………………………38

3章.　ＢＷＩＭシステムの適用性に関する調査………………………………… 39
　3.1　調査項目……………………………………………………………………39
　3.2　橋梁の条件 …………………………………………………………………51
　　3.2.1　単純・連続の違い………………………………………………………51
　　3.2.2　主桁形式による違い（Ｉ桁・箱桁の別） …………………………… 54
　　3.2.3　主桁材料による違い（鋼・コンクリートの別） …………………… 58
　　3.2.4　直橋・斜橋の違い ……………………………………………………… 60
　　3.2.5　荷重分配 ………………………………………………………………… 63
　　3.2.6　支間長の違い……………………………………………………………65
　3.3　車両の走行条件 ………………………………………………………… 66
　　3.3.1　車両の軸数………………………………………………………………66
　　3.3.2　連行・並走条件 ………………………………………………………… 69
　　3.3.3　走行速度の条件 ………………………………………………………… 76
　　　3.3.3.1　走行速度 …………………………………………………………… 76
　　　3.3.3.2　速度変化 …………………………………………………………… 79

3.3.4　車両振動による影響 ………………………………………………………… 80
3.3.5　車両走行位置 …………………………………………………………… 82
3.4　計測の条件 ……………………………………………………………………… 87
3.4.1　主桁の計測位置 ………………………………………………………… 87
3.4.2　床版の計測位置 ………………………………………………………… 90

4章.　ＢＷＩＭシステムの活用……………………………………………………… 91
4.1　台数集計結果 …………………………………………………………………… 93
4.2　全車両リスト分析例………………………………………………………… 98
4.3　留意点 ……………………………………………………………………………112
4.3.1　計測時のエラー …………………………………………………………112
4.3.2　過大な車両 ………………………………………………………………114

5章　総括…………………………………………………………………………………… 116

参考文献……………………………………………………………………………………117

付属資料
国総研ＢＷＩＭ(2004.4版　Ver1.1)
ＷＩＭコード解説資料
取扱説明書
プログラム本体（ＣＤ－Ｒ）

１章．通行車両の重量計測手法

1.1 概要

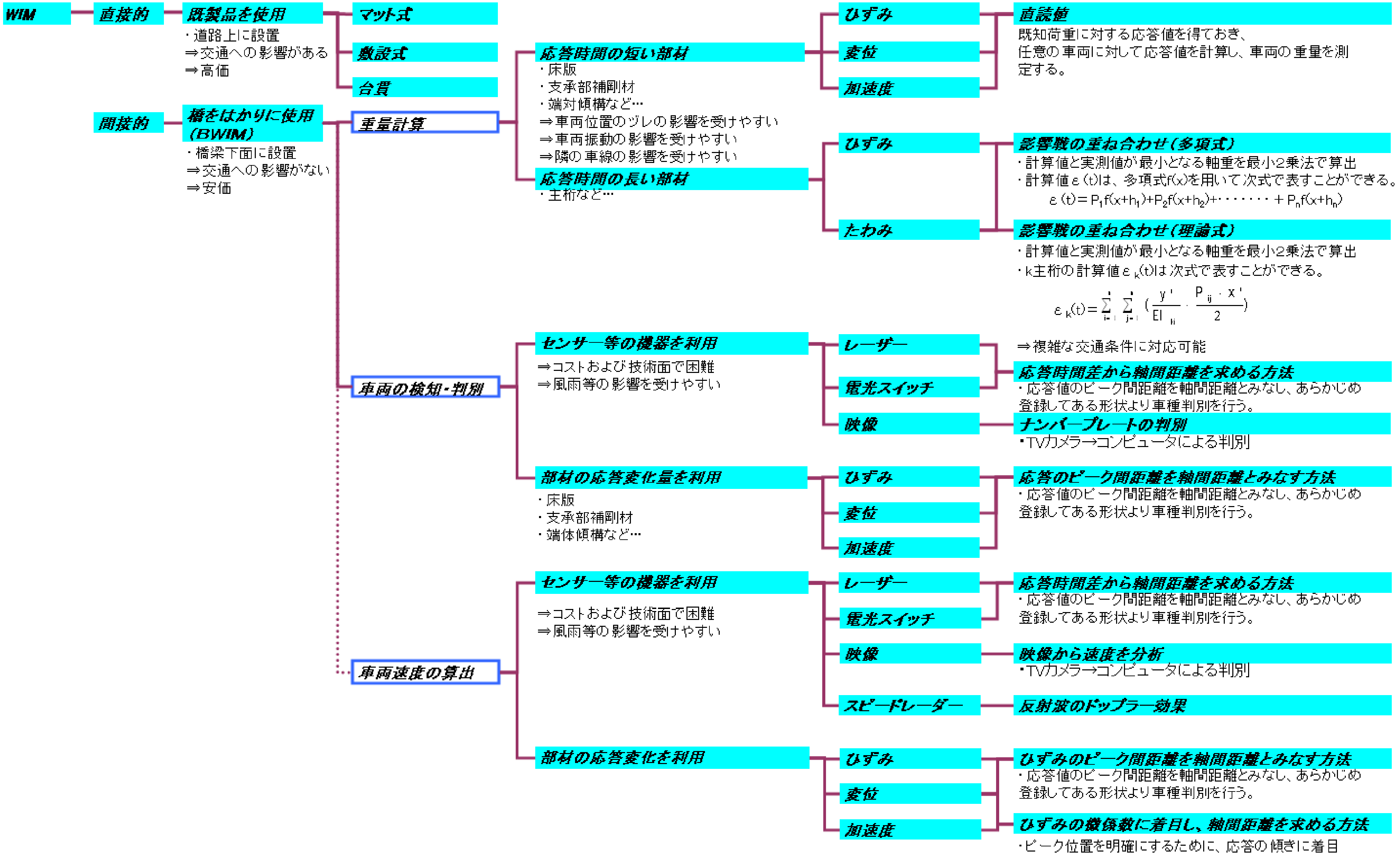
道路橋の通行車両の重量を自然走行状態のまま計測する手法には、図-1.1.1に示すように数多くの種類が存在する。一般的には、埋設型やマット式の重量計を路面に設置して直接的に車両重量を測定する場合が多いが、最近では、橋梁部材の応答を介して間接的に重量を推定する手法も数多く開発されるようになっている[5)～10)]。

このように、橋梁部材を介した間接的な計測方法が注目されるようになった背景には、路面上に軸重計などを設置する方式は、コストや交通への影響といった点で課題が多いのに対し、橋梁部材を用いる方式は計器類が路面にさらされず交通への影響が少ない他、汎用的な機器のみを用いて安価に計測できるといったメリットがあることが挙げられる。

橋梁部材の応答から通行車両の重量を求める手法については、国内外で様々な方法が提案されており、算定に用いる指標、測定に用いる部材、計算のアルゴリズムに関して様々な手法が存在する。しかしながら、橋梁部材の応答から車両重量を求める場合、測定に用いる部材の応答特性や計算上の仮定により、適用可能な橋梁形式や交通条件などに制約がある。したがって、それらの適用にあたっては、各手法の算定精度や適用範囲といった基本的な特性を適切に把握しておかなければならない。

国土技術政策総合研究所橋梁研究室では、全国レベルで大型車の通行実態の傾向を把握するため、橋梁部材の応答特性を実測データに基づいて分析し、それらをふまえて簡便に均質なデータを取得できる通行車両の重量計測システムを提案した。

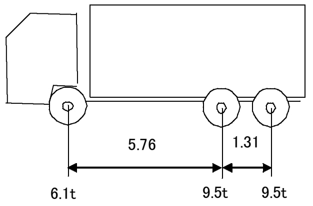
図-1.1.1　主な車両重量計測手法



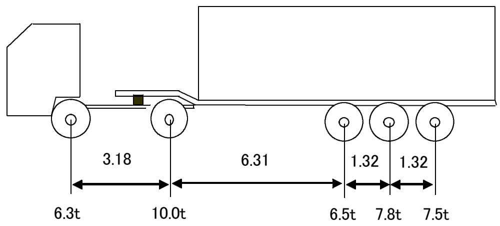
1.2 橋梁部材の応答特性と車両重量計測

1.2.1　橋梁部材の応答特性

橋梁の部材応答を用いた通行車両の重量測定手法の基本特性は、車両の通過に対する橋梁各部の応答性状と密接な関係がある。そこで、独立行政法人土木研究所が所有する試験橋梁において、図-1.2.1 に示す３軸トラックおよび５軸トレーラタイプの大型車を 5km/h, 40km/h, 80km/h の３通りの速度で走行させたときの橋梁各部のひずみ応答を計測した。図-1.2.2 に試験橋梁の概略とひずみの計測位置、図-1.2.3 に、支点部における計測器取り付け位置の詳細、表-1.2.1 および表-1.2.2 にそれぞれ試験橋梁各部の応答波形を示す。これらのひずみ応答波形から、床版のように応答時間の短い部材や、主桁のように応答時間の長い部材が存在し、部材によってひずみ応答の特性は異なっていることがわかる。



(a) ３軸トラック



(b) ５軸トレーラ

図-1.2.1　試験車両の概略

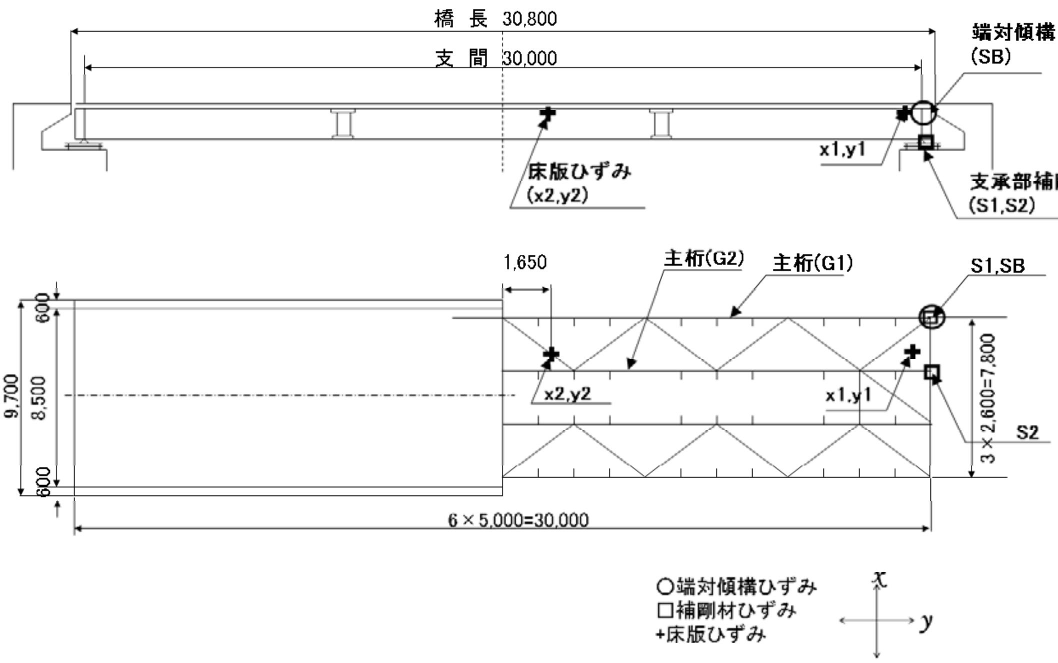


図-1.2.2　試験橋梁の概略とひずみの計測位置

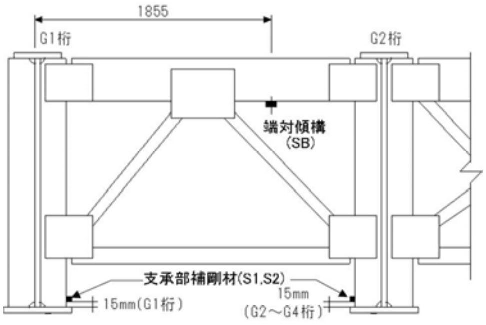


図-1.2.3　支点部におけるひずみ計測位置の詳細（単位 mm）

表-1.2.1 試験橋梁各部の応答（その１・３軸トラック,走行速度 5km/h）

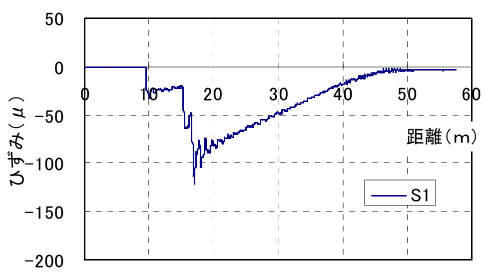
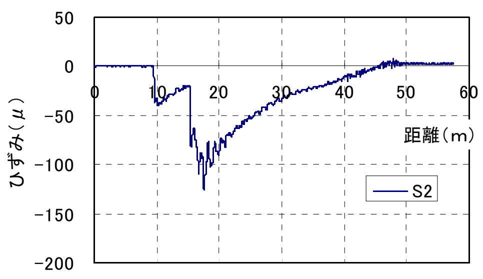
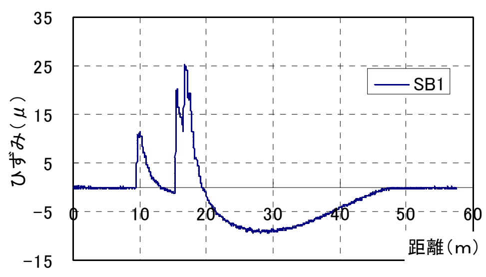
	桁端(X1)	支間中央(X2)
床版 ひずみ （μ） 橋軸方向	計測結果なし	計測結果なし
	桁端(Y1)	支間中央(Y2)
床版 ひずみ （μ） 橋軸直角 方向	計測結果なし	計測結果なし
	G1桁(S1)	G2桁(S2)
支承部 補剛材 ひずみ （μ）		
	G1桁(SB)	
端対傾構 ひずみ （μ）		

表-1.2.1　試験橋梁各部の応答（その２・３軸トラック,走行速度 40km/h）

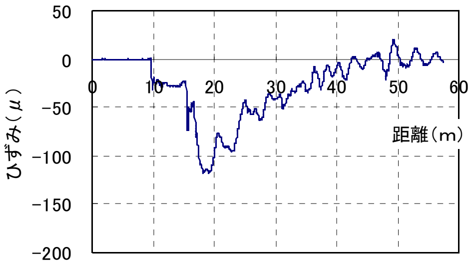
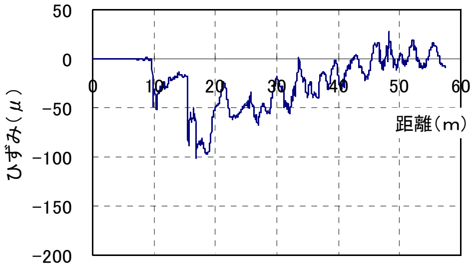
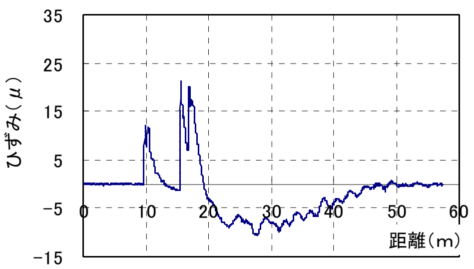
	桁端(X1)	支間中央(X2)
床版 ひずみ （μ） 橋軸方向	計測結果なし	計測結果なし
	桁端(Y1)	支間中央(Y2)
床版 ひずみ （μ） 橋軸直角 方向	計測結果なし	計測結果なし
	G1桁(S1)	G2桁(S2)
支承部 補剛材 ひずみ （μ）		
	G1桁(SB)	
端対傾構 ひずみ （μ）		

表-1.2.1　試験橋梁各部の応答（その３・３軸トラック,走行速度 80km/h）

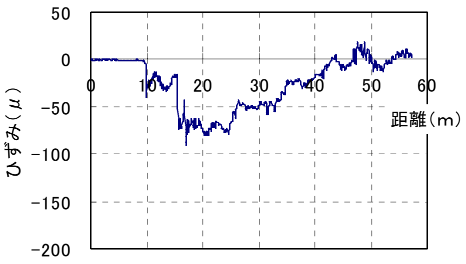
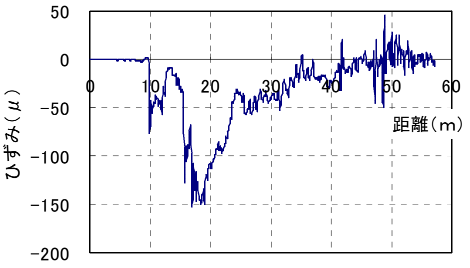
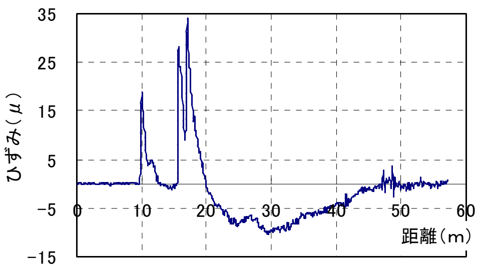
<table>
<tr><td rowspan="2">床版
ひずみ
（μ）
橋軸方向</td><td>桁端(X1)</td><td>支間中央(X2)</td></tr>
<tr><td>計測結果なし</td><td>計測結果なし</td></tr>
<tr><td rowspan="2">床版
ひずみ
（μ）
橋軸直角
方向</td><td>桁端(Y1)</td><td>支間中央(Y2)</td></tr>
<tr><td>計測結果なし</td><td>計測結果なし</td></tr>
<tr><td rowspan="2">支承部
補剛材
ひずみ
（μ）</td><td>G1桁(S1)</td><td>G2桁(S2)</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td rowspan="2">端対傾構
ひずみ
（μ）</td><td>G1桁(SB)</td><td></td></tr>
<tr><td>
</td><td></td></tr>
</table>

表-1.2.1　試験橋梁各部の応答（その４・５軸トレーラ,走行速度 5km/h）

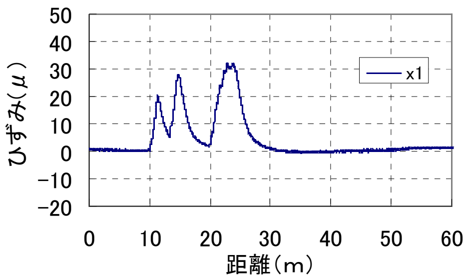
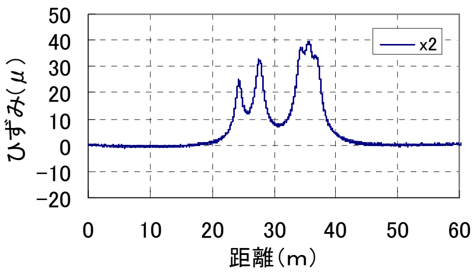
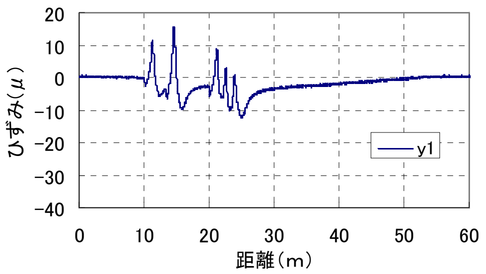
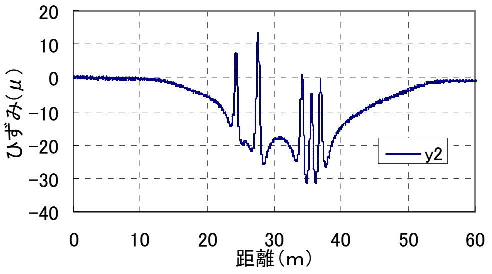
床版 ひずみ （μ） 橋軸直角 方向	X1	X2
		
床版 ひずみ （μ） 橋軸 方向	Y1	Y2
		
支承部 補剛材 ひずみ （μ）	S1	S2
	計測結果なし	計測結果なし
端対傾構 ひずみ （μ）	SB	
	計測結果なし	

表-1.2.1　試験橋梁各部の応答（その５・５軸トレーラ,走行速度 40km/h）

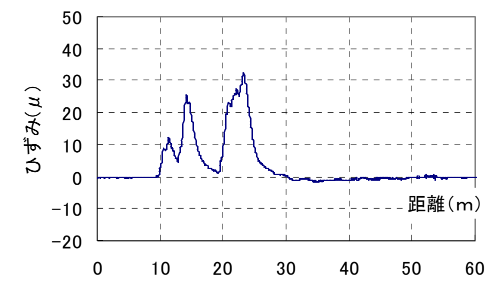
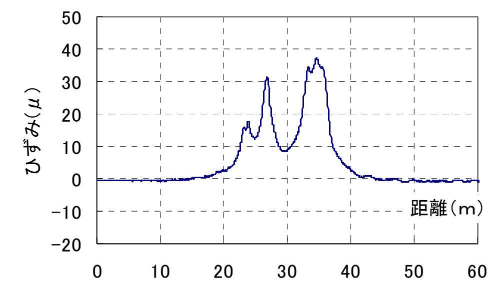
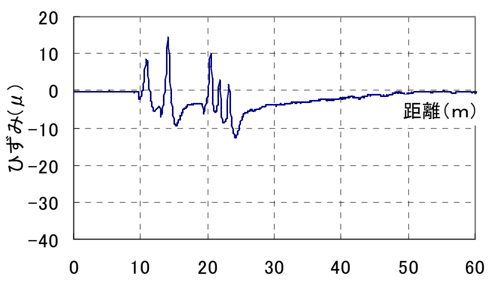
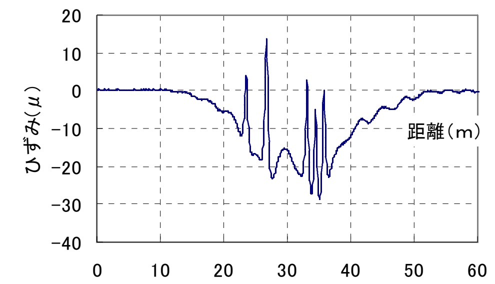
	X1	X2
床版 ひずみ （μ） 橋軸直 角方向		
	Y1	Y2
床版 ひずみ （μ） 橋軸 方向		
	S1	S2
支承部 補剛材 ひずみ （μ）	計測結果なし	計測結果なし
	SB	
端対傾 構ひずみ （μ）	計測結果なし	

表-1.2.1　試験橋梁各部の応答（その６・５軸トレーラ,走行速度 80km/h）

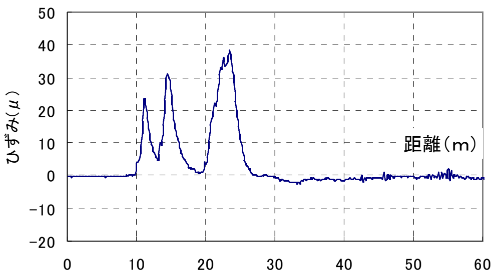
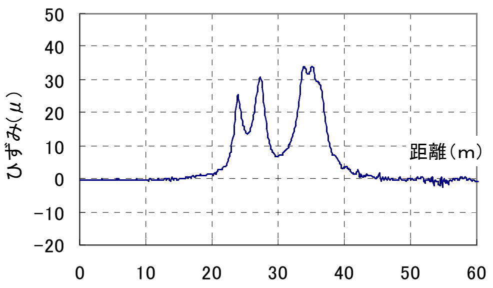
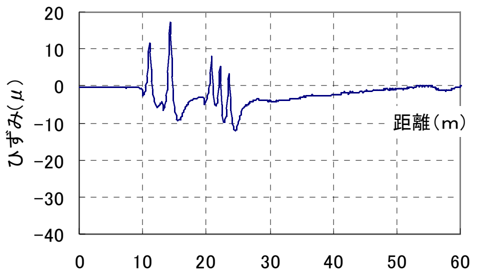
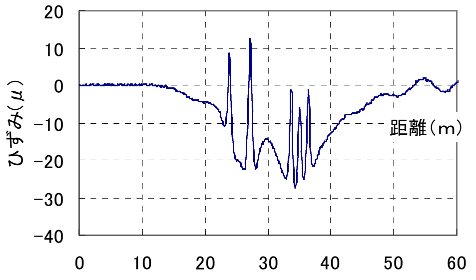
	X1	X2
床版ひずみ（μ）橋軸直角方向		
	Y1	Y2
床版ひずみ（μ）橋軸方向		
	S1	S2
支承部補剛材ひずみ（μ）	計測結果なし	計測結果なし
	SB	
端対傾構ひずみ（μ）	計測結果なし	

表-1.2.2　試験橋梁各部の応答（その１・3 軸トラック,走行速度 5km/h）

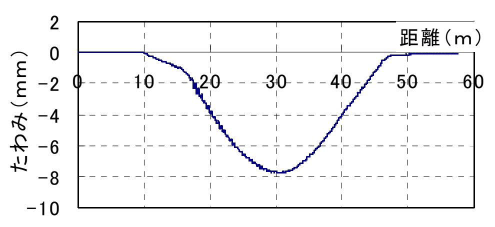
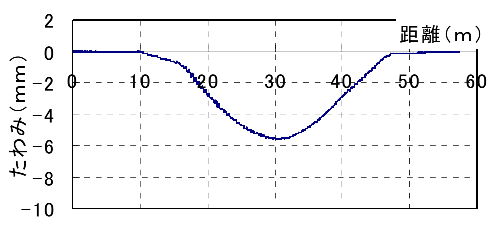
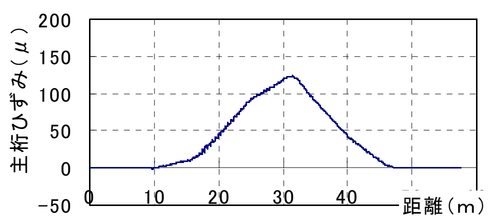
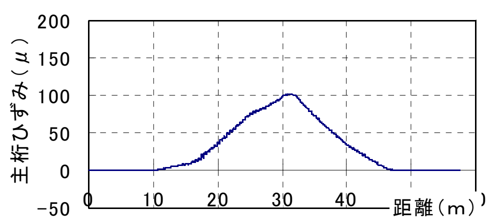
	外桁（車両走行位置直下）	内桁
主桁 たわみ (mm)		
	外桁（車両走行位置直下）	内桁
主桁 ひずみ （μ）		

表-1.2.2　試験橋梁各部の応答（その２・3 軸トラック,走行速度 40km/h）

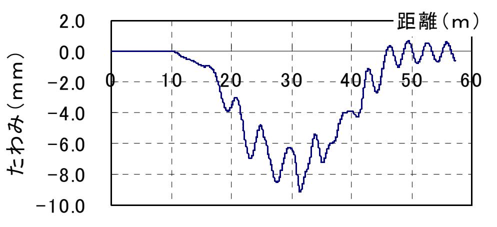
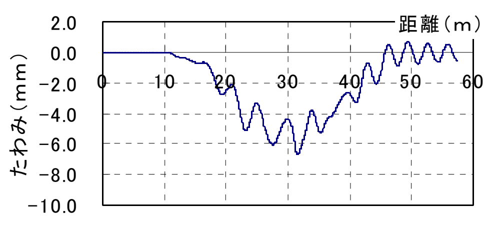
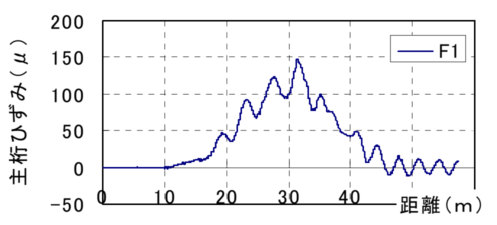
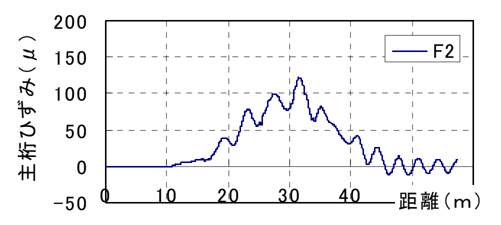
	外桁（車両走行位置直下）	内桁
主桁 たわみ (mm)		
	外桁（車両走行位置直下）	内桁
主桁 ひずみ （μ）		

表-1.2.2　試験橋梁各部の応答（その３・3 軸トラック,走行速度 80km/h）

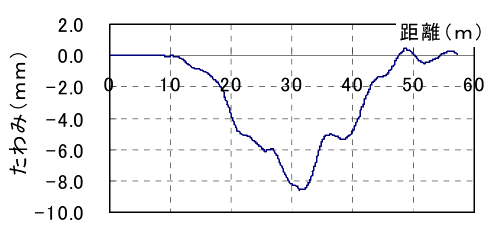
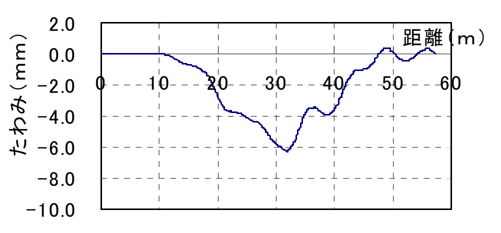
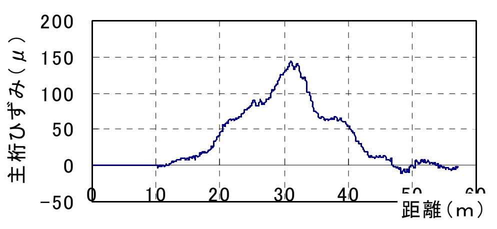
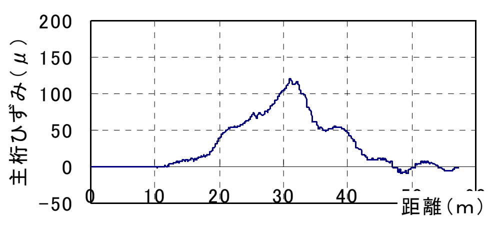
	外桁（車両走行位置直下）	内桁
主桁 たわみ (mm)		
	外桁（車両走行位置直下）	内桁
主桁 ひずみ （μ）		

表-1.2.2　試験橋梁各部の応答（その４・５軸トレーラ,走行速度 5km/h）

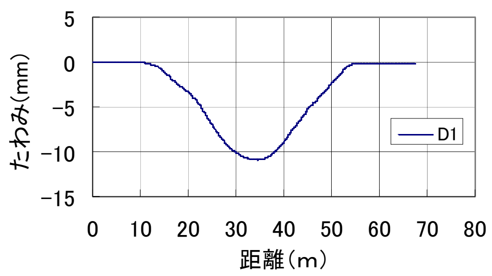
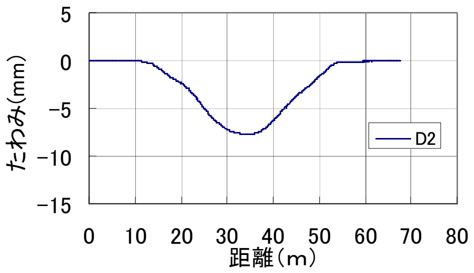
	外桁(車両走行位置直下)	内桁
主桁 たわみ (mm)		
	外桁(車両走行位置直下)	内桁
主桁 ひずみ (μ)	計測結果なし	計測結果なし

表-1.2.2 試験橋梁各部の応答（その５・５軸トレーラ,走行速度 40km/h）

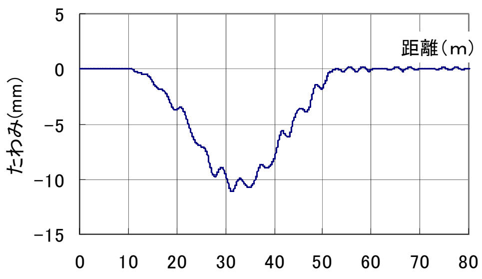
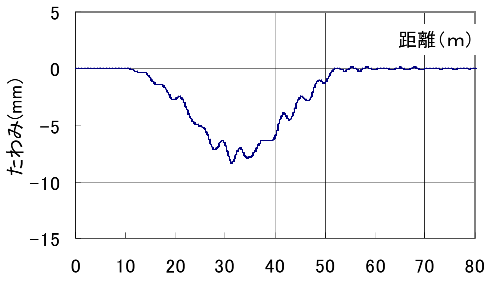
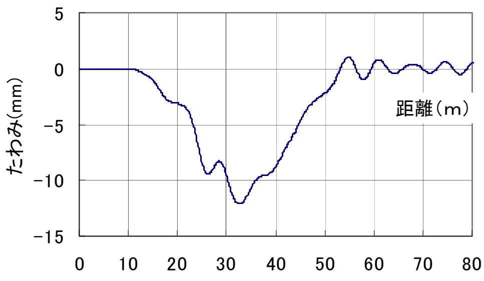
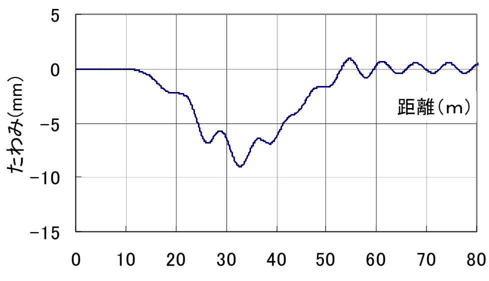
	外桁(車両走行位置直下)	内桁
主桁 たわみ (mm)		
	外桁(車両走行位置直下)	内桁
主桁 ひずみ (μ)	計測結果なし	計測結果なし

表-1.2.2　試験橋梁各部の応答（その６・５軸トレーラ,走行速度 80km/h）

	外桁(車両走行位置直下)	内桁
主桁 たわみ (mm)		
	外桁(車両走行位置直下)	内桁
主桁 ひずみ (μ)	計測結果なし	計測結果なし

1.2.2　通行中の大型車が路面に及ぼす動的荷重

振動をはじめとする通行中の大型車の挙動は、橋梁部材の応答に大きな影響を与えるため、橋梁部材の応答から車両重量を測定する場合に留意すべき点の一つである。橋梁部材応答は、タイヤが路面に及ぼす荷重入力との関係が大きいと考えられるため、ここでは、車輪が路面に及ぼす一軸あたりの動的な荷重（以下、「動的荷重」という）に着目し、それが走行中どのように変化しているのか調査した結果を示す。

図-1.2.4 に前述した試験橋梁前後の路面性状、図-1.2.5 に試験橋梁上を図-1.2.1(b)で示した５軸トレーラが平均約 40km/h で走行した時の駆動軸（２軸目）の動的軸重波形を示す。大型車が橋梁を通過するする際には、絶えず大きく変動する荷重を路面に与え続けており、特に橋梁の伸縮装置付近でその変動幅が大きくなっている様子がわかる。

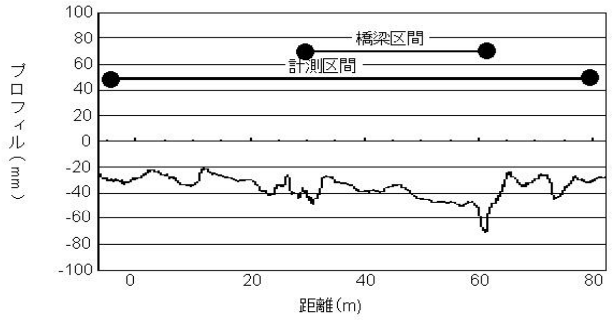


図-1.2.4　試験走路の路面性状(縦断線形)

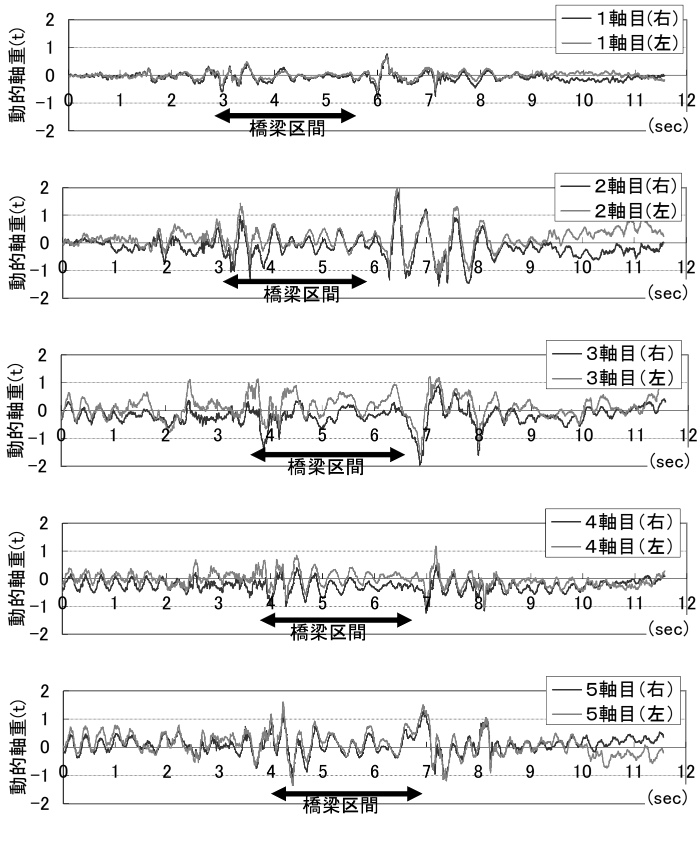


図-1.2.5　５軸トレーラ軸重変動（試験橋梁）

次に、動的軸重の変動の様子をより一般的に評価するため、前述の５軸トレーラを平均

約 35km/h で、標準的な管理状態にあり、橋梁部、土工部等多様な路面条件を有する一般道路上を走行させ、駆動軸の動的軸重の測定を行った。図-1.2.6 に走行経路中の測定区間における路面性状（縦断線形）、図-1.2.7(1)に動的軸重の波形、図-1.2.7(2)に動的軸重の頻度分布を示す。

これらの結果から、一般道路を比較的長距離走行した場合にも動的軸重は大きく変動しており、静的な値に対して± 40 %程度の変動が起こりうることがわかる。そのため、軸重に対する瞬間的な応答値から軸重等を推定する手法においては、車両振動等に伴う誤差が避けがたいと推測される。

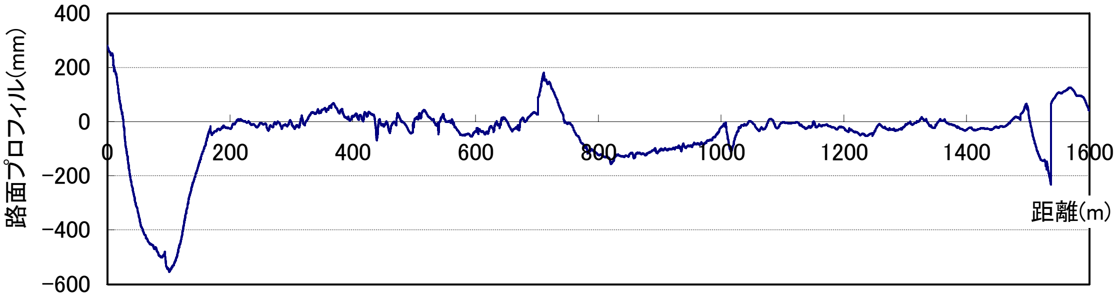


図-1.2.6　一般道路走行経路の路面性状（縦断線形）

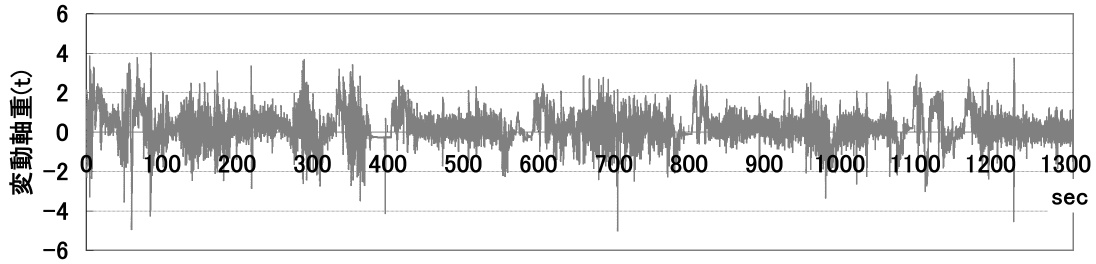


図-1.2.7(1)　一般道路走行時の５軸トレーラ駆動軸(2 軸目)の動的軸重波形の例

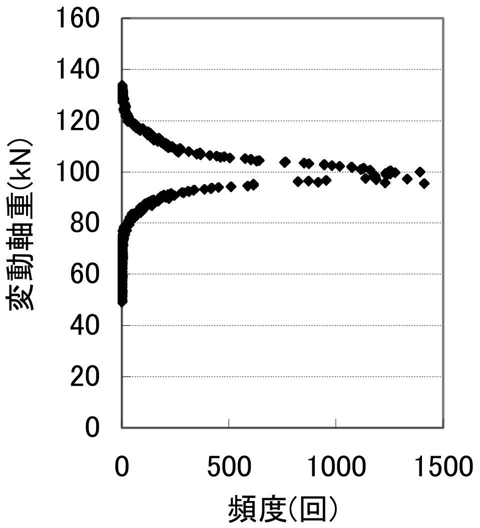


図-1.2.7(2)　一般道走行時の５軸トレーラ駆動軸の軸重頻度分布の例

1.2.3　応答時間の短い部材を用いた車両重量計測手法

床版のように車軸の通過に対する応答時間が短い部材は、図-1.2.8 に示すように、個々の車軸の通過に対して独立性の高い応答となる。また、応答量は軸重値との相関性が高いため、床版下面で計測したひずみ量やひび割れ開閉量から、各車軸の軸重を求めることができる。こうした方法は、重量の算定方法が単純でわかりやすい他、主桁や主構形式の影響を受けにくいなどのメリットがある。

しかしながら、車軸の通過に伴う瞬間的な応答変化に着目する場合、部材は車輪が計測位置付近を通過するときだけ大きく応答するため、車両走行位置の変化や車両振動の影響に伴う誤差が避けられない。

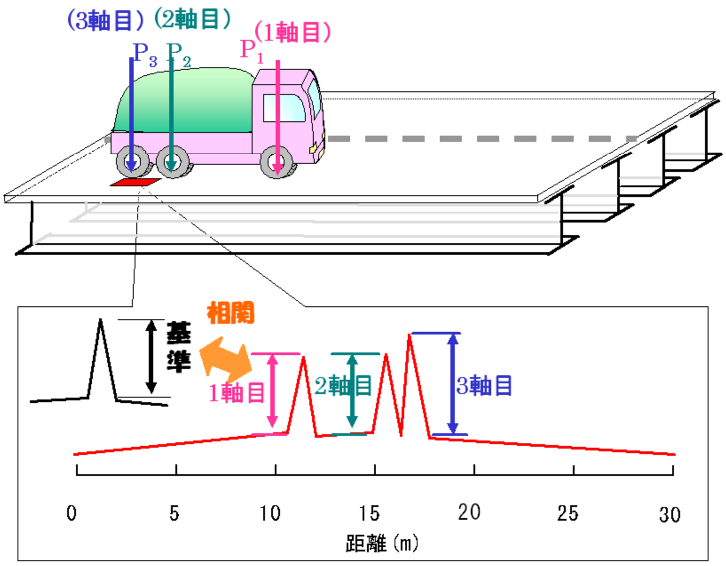


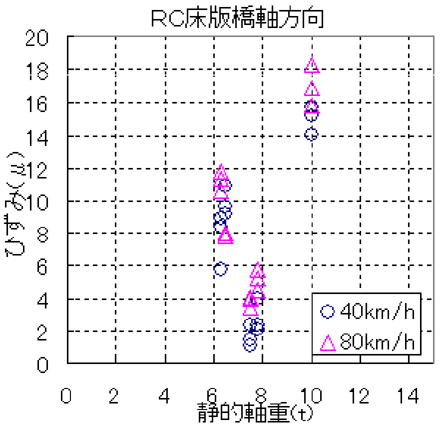
図-1.2.8　影響範囲の短い部材の応答を用いた重量算出のイメージ

ここでは、車両振動の影響により、床版のように応答時間の短い部材の応答変化量に着目して車両重量を算定した場合に、どの程度の算定誤差を生じうるのかを把握するため、試験橋梁を用いて走行速度や走行位置といった条件が同じになるように、計測を実施したときの、ひずみのピーク値を表-1.2.3 に示す。また、図-1.2.9 には、部材別に軸重とひずみのピーク値との関係を図示する。

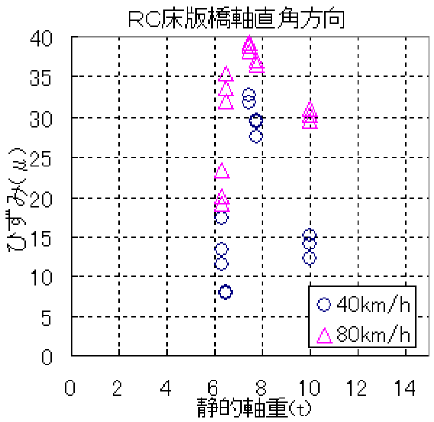
これらの結果より、応答時間が短い部材におけるひずみ応答のピーク値は大きくばらついていることが確認された。したがって、軸重に対する瞬間的な応答値から軸重等を推定する手法においては、車両振動等に伴う誤差が避けがたく、それらの値から軸重を精度良く推定するためには、センサーの設置箇所を増やすなどといった工夫が必要である。

表-1.2.3　応答の最大値(最小値)のばらつき

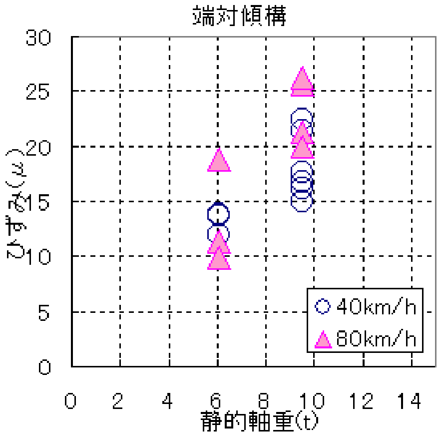
部材		車両	走行速度	ひずみ(μ)			1回目に対する割合(%)	
				回数	駆動軸	3軸目	駆動軸	3軸目
RC床版	橋軸直角方向	5軸トレーラ	40km/h	1	15.22	9.68	−	−
				2	14.09	10.19	93	105
				3	12.22	7.98	80	82
			80km/h	1	17.91	8.06	−	−
				2	16.92	7.88	94	98
				3	16.74	7.89	93	98
	橋軸方向	5軸トレーラ	40km/h	1	23.69	22.61	−	−
				2	24.14	22.95	102	102
				3	26.01	23.05	110	102
			80km/h	1	31.05	32.85	−	−
				2	29.53	36.96	95	113
				3	29.21	34.92	94	106
端対傾構		3軸トラック	40km/h	1	13.90	16.05	−	−
				2	13.69	17.91	98	112
				3	11.22	22.43	81	140
垂直補剛材		3軸トラック	40km/h	1	−85.24	−171.38	−	−
				2	−90.51	−199.60	106	116
				3	−71.90	−205.10	84	120
横桁取付部垂直補剛材		3軸トラック	40km/h	1	−173.87	−331.02	−	−
				2	−199.62	−427.36	115	129
				3	−162.27	−394.73	93	119



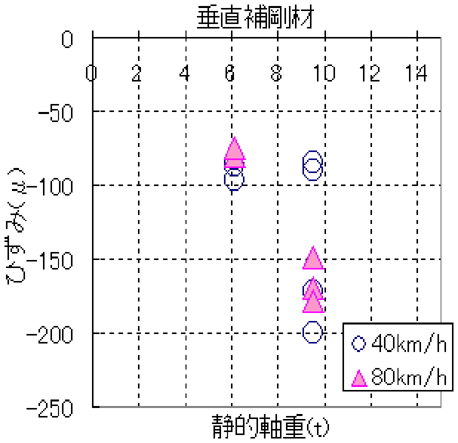
(a)RC 床版橋軸方向ひずみ



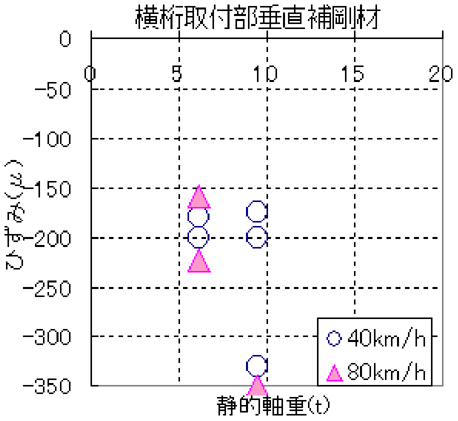
(b)RC 床版橋軸直角方向ひずみ



(c)端対傾構ひずみ



(d)垂直補剛材ひずみ



(e)横桁取付部垂直補剛材ひずみ

図-1.2.9　各軸のひずみ応答ピーク値と静的軸重の関係

1.2.4　応答時間の長い部材を用いた車両重量計測手法

図-1.2.10 に示す主桁のように、車両が橋梁上を通過する間、継続的に応答する部材の場合、応答は橋梁上に存在する各輪荷重の影響の総和となって表れる。そのため、軸重、軸距等の諸元が既知である車両を用いて、あらかじめ主桁ひずみの影響線を求めておくことにより、ある時刻に橋梁上に存在する各軸重（未知数）と影響線との線形和が、実際の応答に等しくなることを利用して連立方程式を作成し、軸重や総重量を求めることができる。

こうした方法では、走行位置の変化や車両の振動に対する感度は低く、固有の測定条件に支配されにくいのが特徴である。しかしながら、橋梁上に複数の車両が存在する場合には、連立方程式の未知数が多くなるため、軸重の算定精度には一定の限界がある。

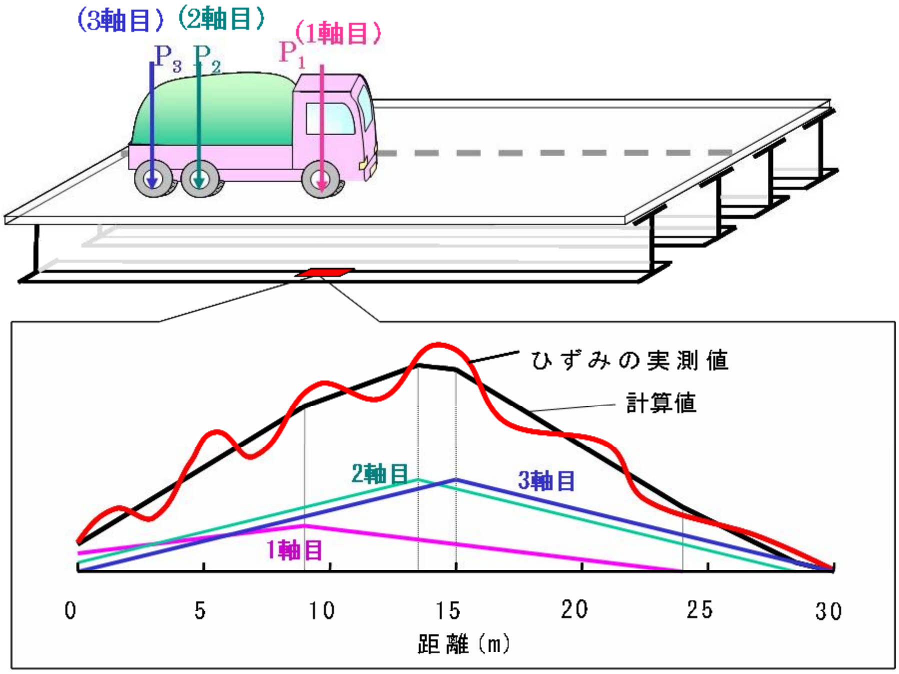


図-1.2.10　影響線を重ね合わせたひずみ応答近似のイメージ

２章. ＢＷＩＭの内容

2.1　システムの開発目標

当システムの開発にあたっては、道路橋の設計活荷重検討のための全国規模の自動車荷重の傾向調査に活用することを念頭に、測定の簡便性と汎用性、測定されたデータの均質性に配慮した。そこで、主桁のひずみ応答を利用し、影響線の線形和と実測波形との誤差を最小化する計算により、車両重量を算定する方法を採用することとした。以下に、開発にあたって目標とした主な性能を示す。

・大型車について、個々に、総重量、軸重、軸数、軸距の推定ができる。
・全ての計測を橋梁の下で行い、計測行為が交通の特性に影響を与えない。
・２車線以上で交通量が多く、連行、並走状態を生じやすい路線にも対応できる。
・計測にあたってなるべく特殊な技術や機器を必要としない。
・一カ所当たりの計測費用が安価となる。
・各種の交通条件、橋梁条件に対し、適用範囲、精度レベルが明確である。

2.2　システムの基本構成と算定の流れ

図-2.2.1 に当システムの基本構成、図-2.2.2 にその算定の流れを示す。当システムでは、まず、軸重、軸距等の諸元が既知である車両（以下、「荷重車」という）を用いて、主桁のひずみの影響線を求める事前計測を行う。それに続いて、通過が確認された車軸の軸重（未知量）と事前計測で求めた影響線（既知量）との線形和が、主桁のひずみの実応答に等しくなるとして、互いの差が最小となるように連立方程式を作成し、各車両の軸重、総重量などを求める本計測を行う手順になっている。

なお、車両通過の有無の検出、走行速度、軸距等の算定は、車軸の通過に対し、鋭くとがった影響線形状となる部材のひずみ応答を利用する。また、軸重列から一台一台の車両への分離は別途作成した車両判別のアルゴリズムを使用する。

測定に用いる機器は、ひずみゲージ、動ひずみアンプ、パソコン、といった汎用的なものばかりであり、安価で手軽に測定ができるように構成した。

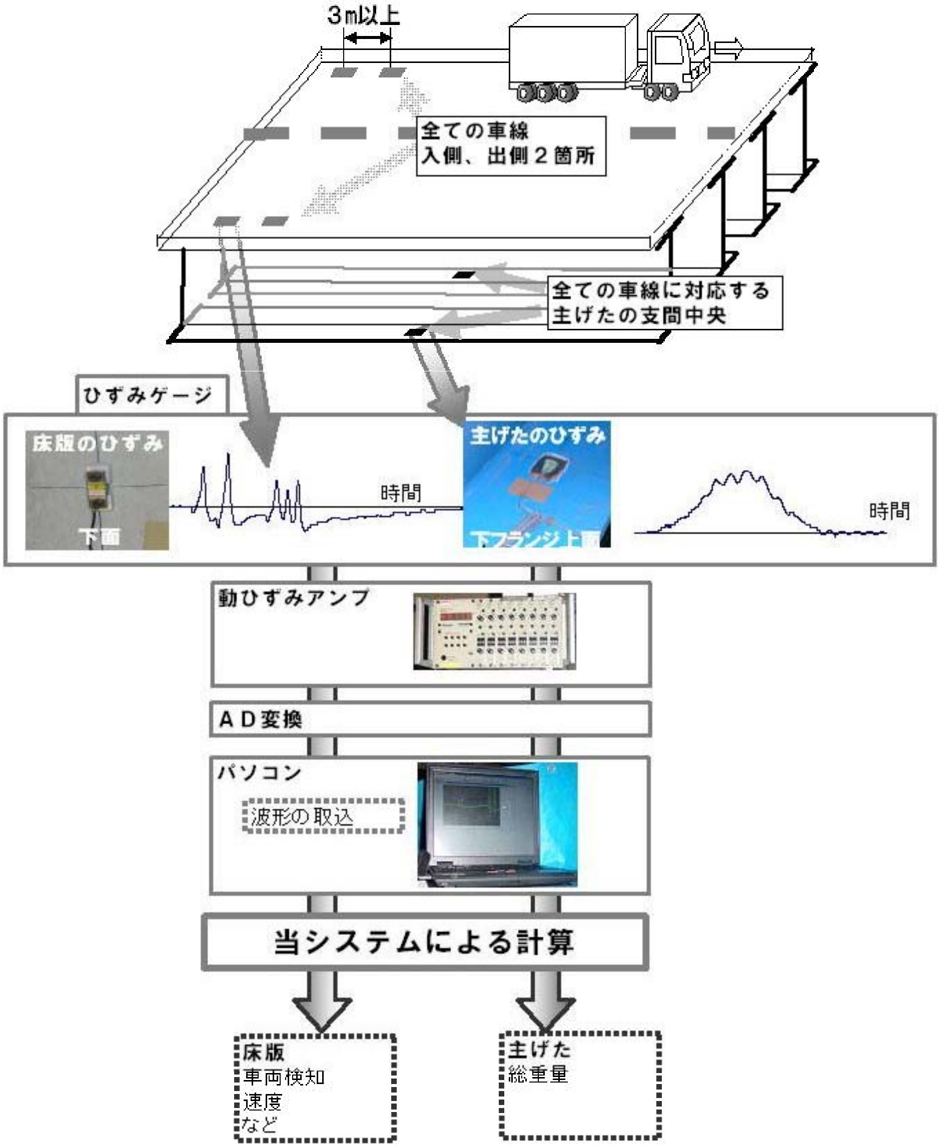


図-2.2.1　システムの基本構成

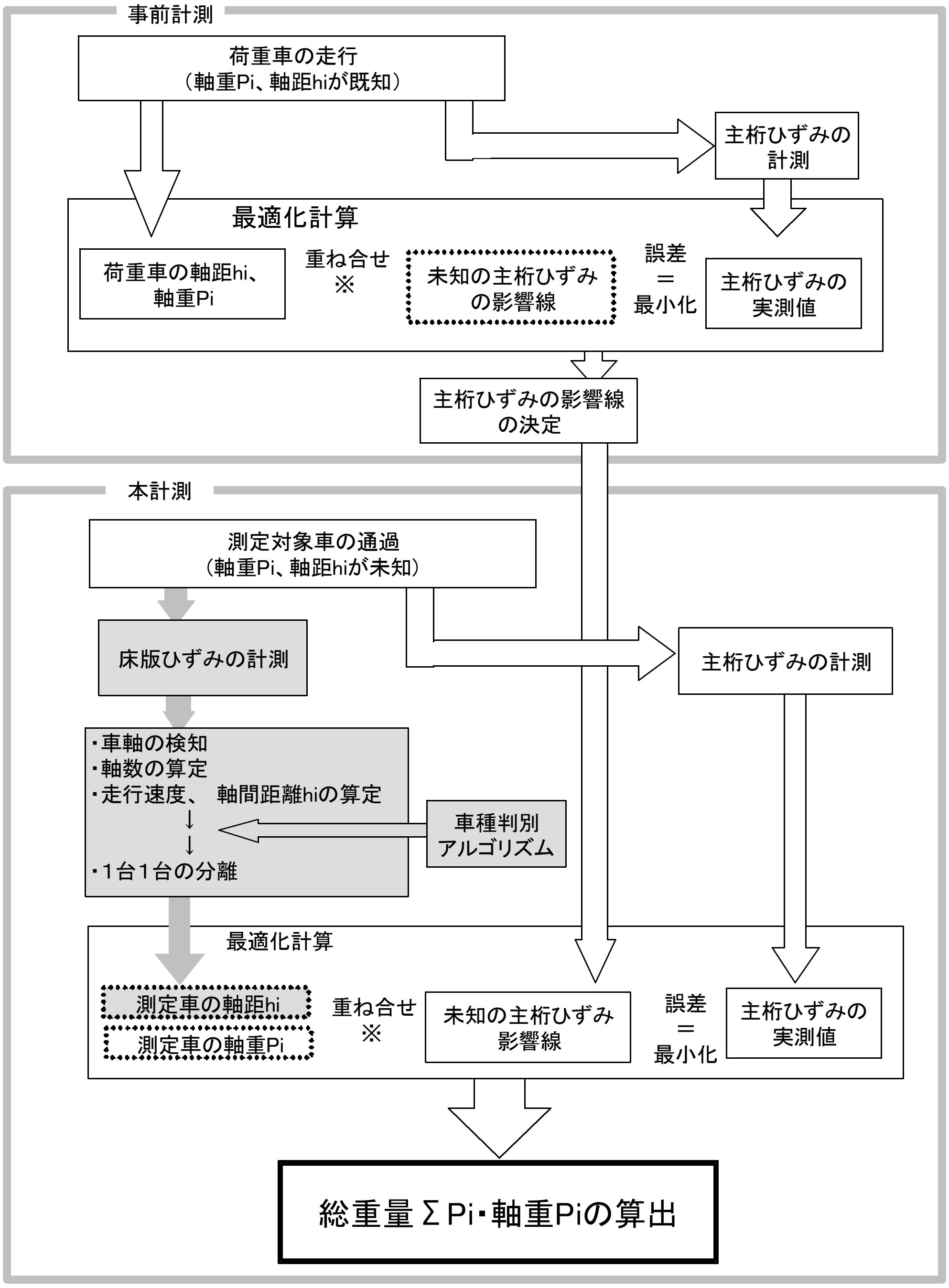

事前計測
荷重車の走行
（軸重Pi、軸距hiが既知）
主桁ひずみの
計測
最適化計算
荷重車の軸距hi、
軸重Pi
重ね合せ
※
未知の主桁ひずみ
の影響線
誤差
＝
最小化
主桁ひずみの
実測値
主桁ひずみの影響線
の決定
本計測
測定対象車の通過
（軸重Pi、軸距hiが未知）
床版ひずみの計測
主桁ひずみの計測
・車軸の検知
・軸数の算定
・走行速度、 軸間距離hiの算定
↓
↓
・1台1台の分離
車種判別
アルゴリズム
最適化計算
測定車の軸距hi
測定車の軸重Pi
重ね合せ
※
未知の主桁ひずみ
影響線
誤差
＝
最小化
主桁ひずみの
実測値
総重量ΣPi・軸重Piの算出

図-2.2.2　算定の流れ

2.3　車軸の検知

車軸の検知は、図-2.3.1 に示すような、車軸の通過に対し、各軸毎に独立した応答変化を示す部材を用いて行う。また、走行方向に間隔をおいて 2 カ所測定すれば、センサー間の距離と通過時間の差から走行速度や軸間距離を算出することができる。

表-2.3.2 には、車軸の通過に対し、顕著な応答変化を示す部材における応答波形の例を示す。床版、端対傾構、垂直補剛材のひずみ応答では、車軸の通過時に明瞭なピークがみられ、特に橋軸方向の床版のびずみ応答では、タンデム軸のような近接する軸同士でも独立した応答波形が得られている。一方、支点部の垂直補剛材では、各軸の通過に対応した応答変化が見られるが、車両振動の影響で応答変化がわかりづらくなる場合もある。

これらの部材応答の測定結果をふまえて、車軸の検知にあたっては、床版下面の橋軸方法のひずみのように各軸毎に独立した明瞭な応答変化を示す部材を用いるのがよいが、既設橋梁のＲＣ床版では著しいひびわれがある場合や下面への鋼板接着による補強が行われている場合など、必ずしも適切にひずみの計測が行えない場合も少なくない。そのような場合には、床版の代わりに、軸の判別が可能であるその他の部材を用いてもよい。

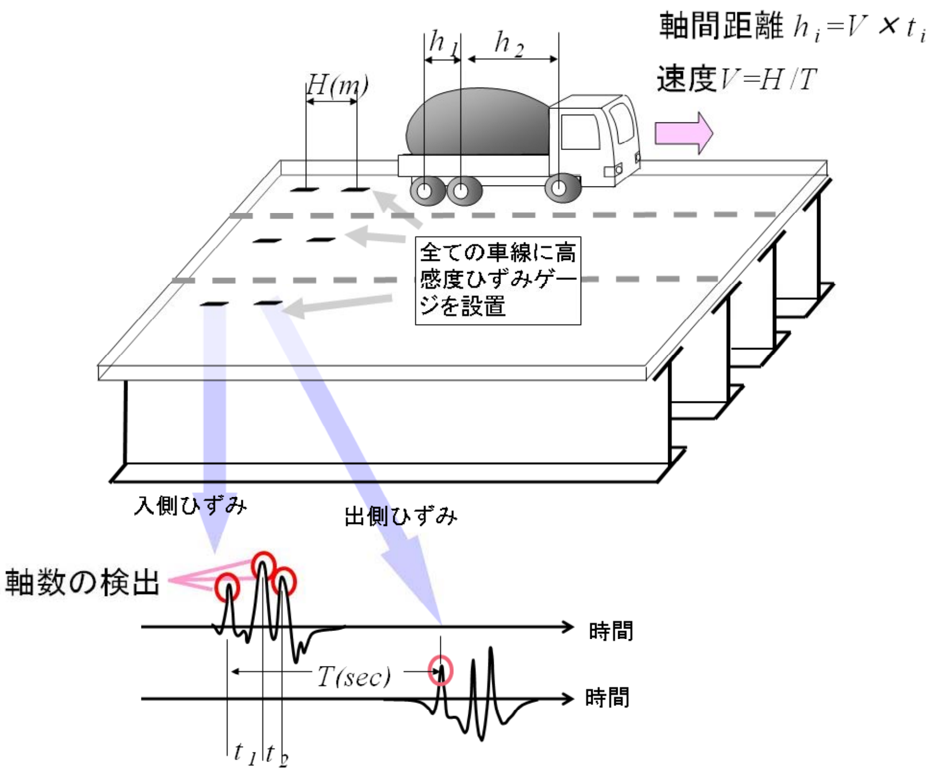
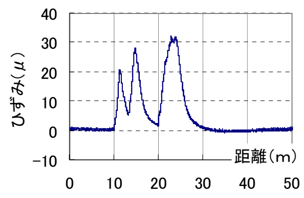
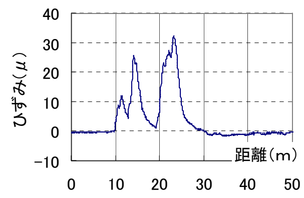
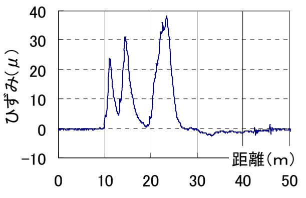
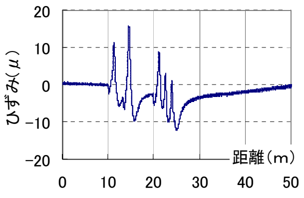
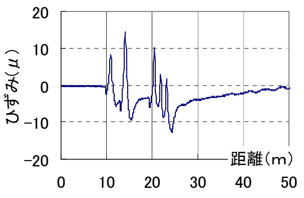
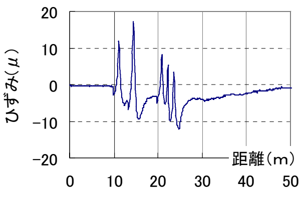
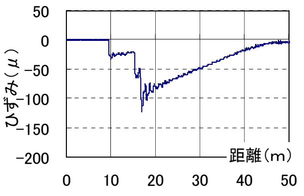
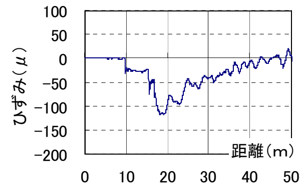
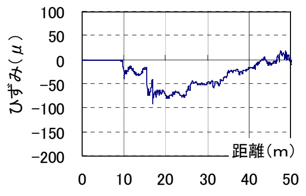
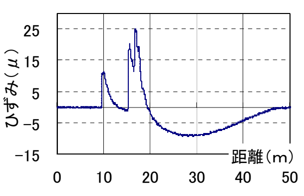
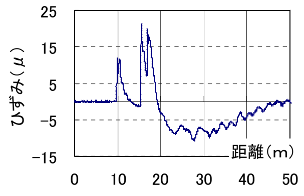
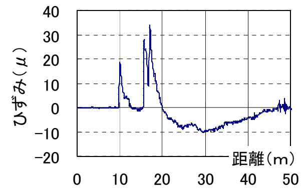


図-2.3.1　計測方法の概要

表-2.3.1　応答波形の例

		走行速度 5km/h	走行速度 40km/h	走行速度 80km/h
5軸トレーラ	橋軸直角方向床版ひずみ(x1)			
	橋軸方向床版ひずみ(y1)			
3軸トラック	支承部主桁垂直補剛材のひずみ(S1)			
	端対傾構のひずみ(SB)			

2.4　車両の分離（軸数の判別）

応答時間の短い部材の波形から得られる情報は、そのままでは車軸の存在と、個数、位置関係だけを示す軸重列にすぎない。そのため、個々の車両の重量を求めるためには、車両一台一台を分離し、測定時にどの車線に何台の車両が存在しているか、正しく把握することが必要である。

そこで、当システムは、同一車線上に存在する一台一台の車両の分離を図-2.4.1 に示す「車両判別のアルゴリズム」を用いて行う。このアルゴリズムは、「1999 年版車両諸元表 1)」（以下「現有車両諸元表」という）に記載された車両と、平成 9, 11, 12 年度に関東地方整備局東京国道工事事務所に特殊車両として通行許可申請された車両を利用して、実在する大型車両の諸元を広範に分析し、軸間距離のパターンなどに基づいて作成したものである。表-2.4.1 に、ここで分析対象とした車両の車種、軸数別の台数を示す。

表-2.4.1　分析対象とした車両の台数

車両	軸数(台)	1999年版車両諸元表	特車申請車両
単車	2	101	17
	3	107	11
	4	28	27
	5	0	6
	6	0	4
	合計	236	65
セミトレーラ	3	27	2
	4	84	54
	5	33	43
	6	9	23
	合計	153	122
フルトレーラ	5	0	20
	合計	0	20
合計(台)		389	207

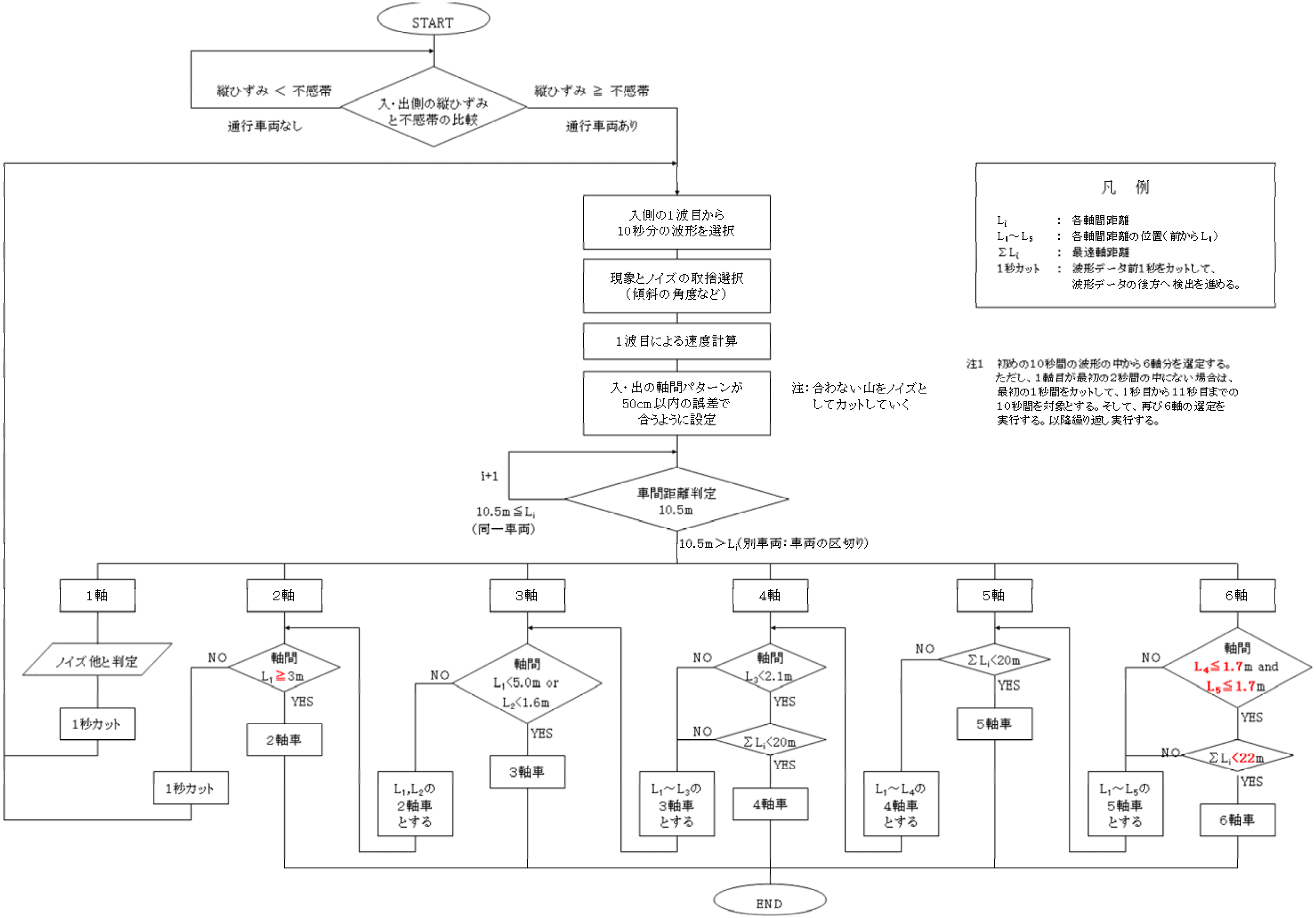


図-2.4.1　車種判別アルゴリズム

(2) 軸間距離のパターン分析

1) 軸間距離による分離

分析対象とした全車両の隣接する車軸相互の距離の分布状況を図-2.4.2 に示す。これより大型車両の隣接軸距は、ほぼ 10.5m 未満の範囲に分布していることがわかる。そのため、検出された軸重列において、隣接する車軸相互の距離が 10.5m を超える場合には、それぞれの車軸が別々の車両に属しているものとみなすこととした。10.5m を超える軸距を有する車両を測定の対象とするために別車両とみなす軸間距離の最小値を大きくすると、分離された軸重列の中に複数の車両が含まれるケースが増え、この後のステップでの処理が煩雑となるため、ここでは、別車両とみなす軸間距離の最小値を 10.5m と設定した。以上を「軸間距離による分離」と呼ぶこととする。

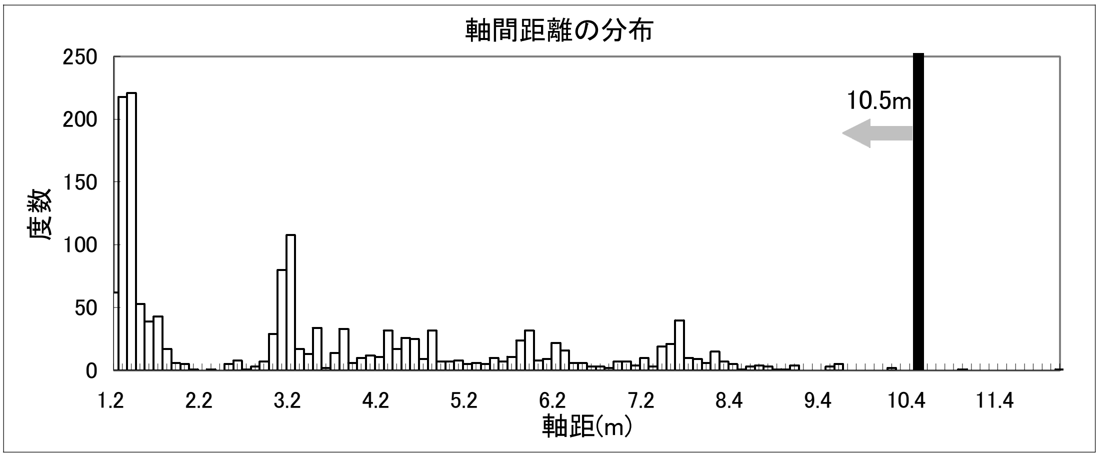


図-2.4.2　隣接軸距の分布状況

2) 6軸車の判別

ここでは、前述の「軸間距離による分離」において、6軸と判定された軸重列について、それが1台の6軸車両に対応するものか､複数台の車両からなるものであるかを判別する。

現有車両諸元表から6軸車両のほとんどは、図-2.4.3 に示すような 3 軸のトラクタがトリプル軸をもつトレーラを牽引した状態のものであり、これ以外の形式で6軸となる車両はほとんど存在しない。

図-2.4.4 には、3軸のトラクタがトリプル軸を有するトレーラを牽引した車両について、トリプル軸の軸距 L4 および L5 の分布を示す。図-2.4.4 より、トリプル軸の軸間距離は 1.7m 以下の範囲に分布している。さらに、図-2.4.5 に示した全調査対象車両の最遠軸距の分布では、最遠軸距が 22m 以上となる6軸車はみられないため、トリプル軸の軸間距離 L4, L5 が 1.7m 以下の場合でも、最遠軸距が 22m 以上となる場合には、6軸車とはせず、複数の車両からなる軸重列とみなすこととした。

以上を「6軸車の判別」と呼ぶこととし、6軸車の判別フローを図-2.4.6 に示す。

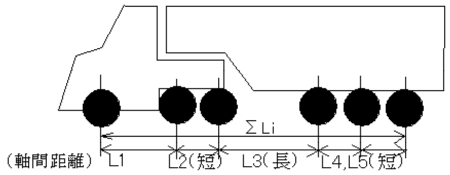


図-2.4.3　代表的な 6 軸車の軸配置例

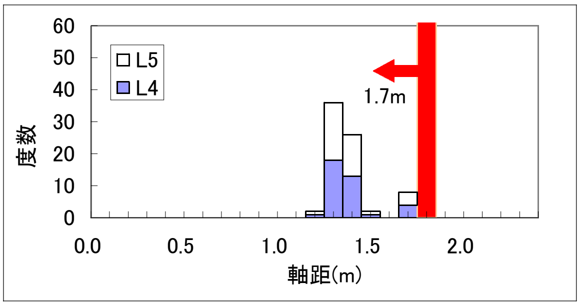


図-2.4.4　6 軸車のトリプル軸の軸間距離 L4 および L5 の分布

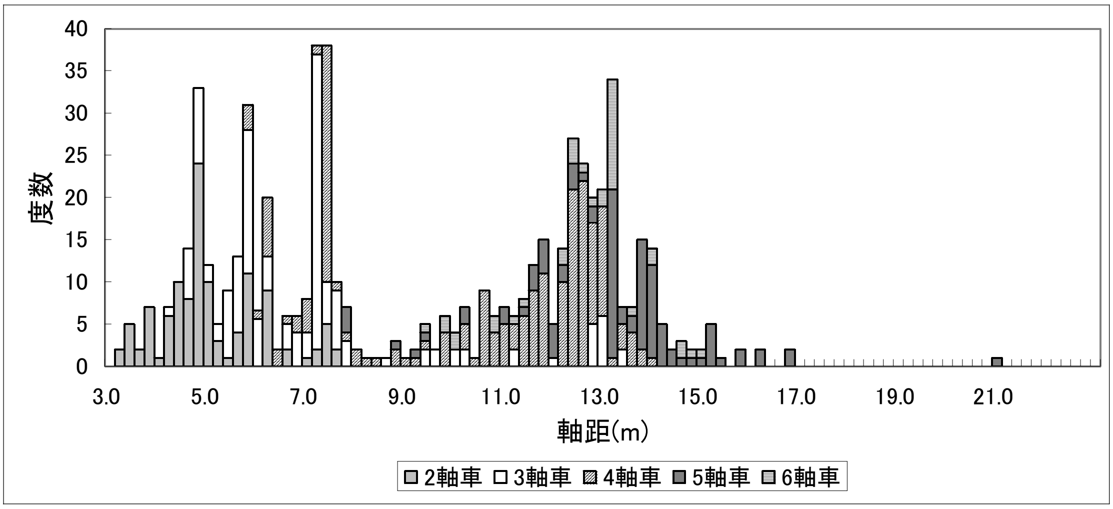


図-2.4.5　最遠軸距の分布

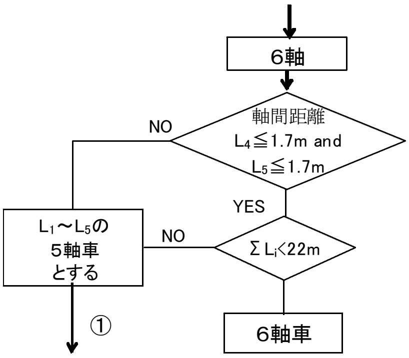


図-2.4.6　6 軸車の判別フロー

3) ５軸車の判別

ここでは、前述の「車間距離による分離」において、５軸と判別された軸重列および「６軸車の判別」で６軸車でないと判別された軸重列のうち、前から５つの軸重列について、それらが１台の５軸車両に対応するものか､複数の車両からなるものであるかを判別する。

図-2.4.5 に示した大型車両の最遠軸距の分布状況から、５軸車の最遠軸距が 20m 以上となることはほとんどないことがわかる。また、連行走行する複数の大型車の全長が 20m 未満となることもほとんどないと考えられる。そのため、５軸車の判別では、軸重列の長さが 20m 以上となった場合には、これらが異なる複数の車両からなる軸重列であるとみなし、それ以外にものについて５軸車と判別することとした。

以上を「５軸車の判別」と呼ぶこととし、５軸車の判別フローを図-2.4.7 に示す。

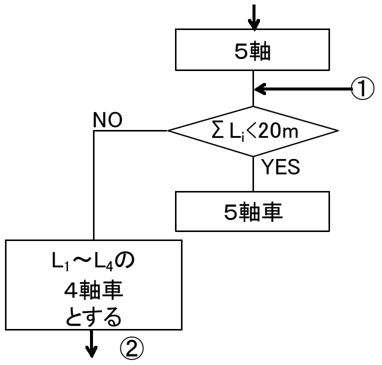


図-2.4.7　５軸車の判別フロー

4) ４軸車の判別

ここでは、前述の「車間距離による分離」において４軸と判定された軸重列および「５軸車の判別」で５軸車でないと判定された軸重列のうち、前から４つの軸重列について、それらが１台の４軸車両に対応するものか､複数の車両からなるものであるかを判別する。

現有車両諸元表から、４軸車の多くは、図-2.4.8 に示すような 2 軸トラクタとタンデム軸を有するトレーラの組合せである。図-2.4.9 に４軸車におけるタンデム軸の軸距 L3 の分布を示す。

図-2.4.9 より、４軸車のタンデム軸の軸間距離 L3 は、ほとんどが 2.1m 未満の範囲に分布していることがわかる。一方、走行時に異なる車両間で車軸の距離が 2.1m 未満に近接することは考えにくいため、４つの軸重列のうち末尾の２軸の軸距が 2.1m 未満の場合には、４軸車と判別することとした。

さらに、図-2.4.5 に示す最遠軸距の分布状況から、最遠軸距が 20m 以上となるケースはほとんどないため、後ろ２軸の軸間距離が 2.1m 未満の場合でも、最遠軸距が 20m を超える場合には、１台の４軸車とはせず、複数の車両からなる軸重列とみなすこととした。

以上を「４軸車の判別」と呼ぶこととし、４軸車の判別フローを図-2.4.10 に示す。

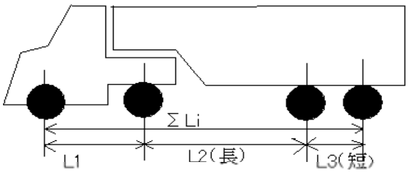


図-2.4.8　代表的な4軸車の軸配置例

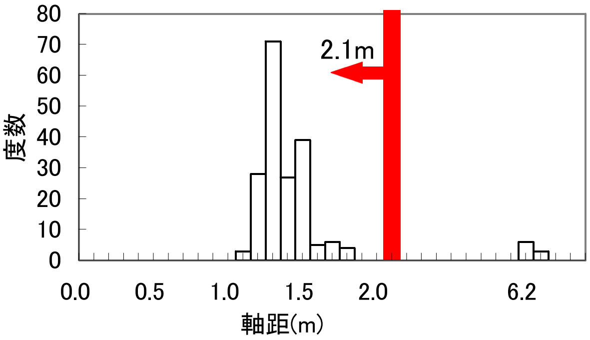


図-2.4.9　4軸車のタンデム軸の軸間距離L3の分布

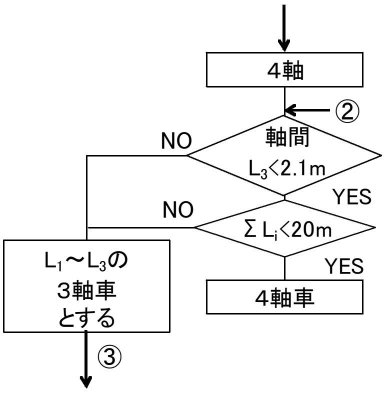


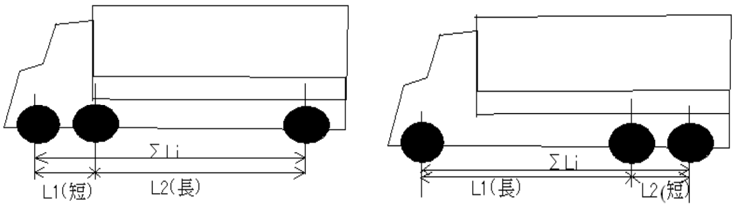
図-2.4.10　4軸車の判別フロー

5) 3軸車の判別

ここでは、前述した「車間距離による分離」において3軸と判定された軸重列および「4軸車の判別」で4軸車でないと判定された軸重列のうち、前から3つの軸重列について、それらが1台の3軸車両に対応するものか、それ以外であるかの判別を行う。

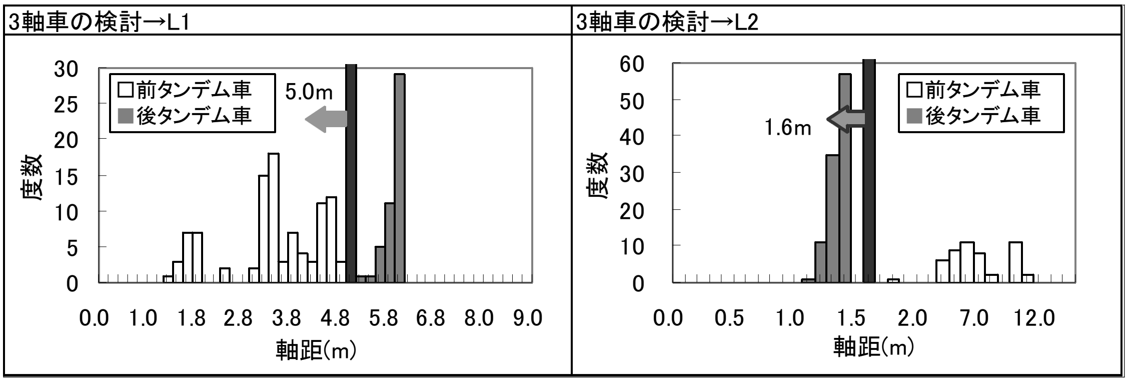
3軸の大型車は、図-2.4.11 に示すような前タンデムと後タンデムの2つのタイプに大別でき、図-2.4.12 に示す軸距の分布状況から、前タンデム車では軸距 L1（第1軸と第2軸の距離)が 5m 未満であるケースが多く、後ろタンデム車では軸距 L2（第2軸と第3軸の距離)が 1.6m 未満となるケースが多いことがわかる。そのため、軸距 L1 が 5.0m 未満、もしくは軸距 L2 が 1.6m 以上の場合には、3軸車と判別することとした。

以上を「3軸車の判別」と呼ぶこととし、3軸車の判別フローを図-2.4.13 に示す。



(a)前タンデム車　　　　　(b)後タンデム車

図-2.4.11　代表的な３軸車の軸配置例



(a)第１軸～第２軸(L1)　　　　　(b)第２軸～第３軸(L2)

図-2.4.12　４軸車の隣接軸距の分布

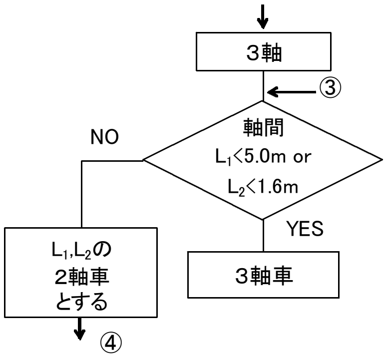


図-2.4.13　３軸車の判別フロー

6) ２軸車の判別

ここでは、前述した「車間距離からの分離」において２軸と判定された軸重列および「３軸車の判別」で３軸車でないと判定された軸重列のうち、前２つの軸重列について、それらが１台の２軸車両に対応するものであるかどうかの判定を行う。

図-2.4.14 に示す 2 軸の大型車の軸距分布によると、軸距は、3.0m 以上の範囲に分布しているため、対象となる２軸間の距離が 3.0m 以上の場合には 2 軸車と判別し、それ以外については車両として扱わないこととした。

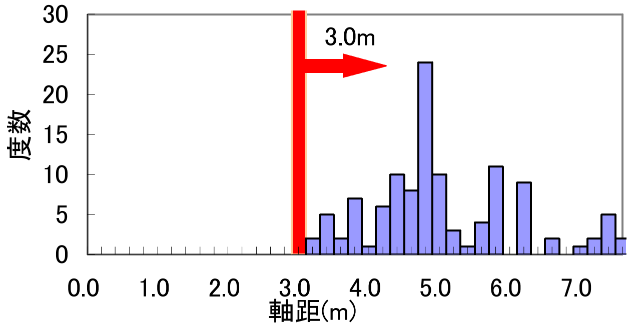


図-2.4..14　第 1 軸～第 2 軸(L1)の隣接軸距の分布

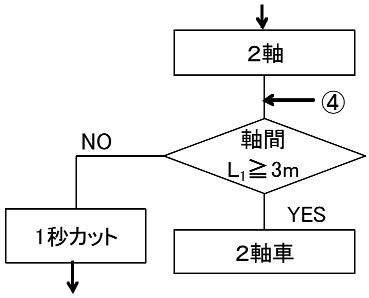


図-2.4.15　2 軸車の判別フロー

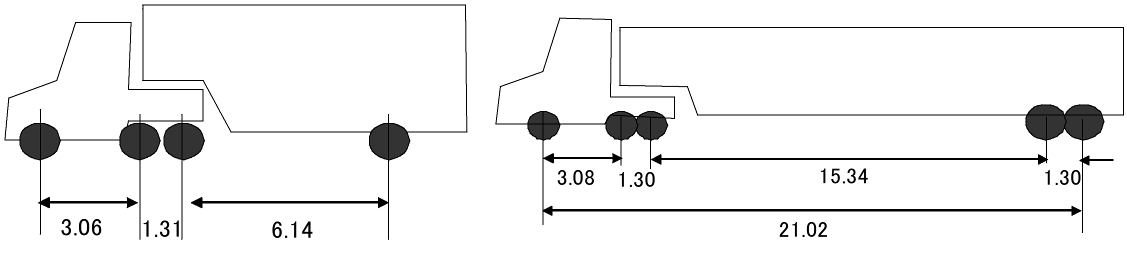
(3) 車両判別アルゴリズムの検証

車両判別のアルゴリズムで、適切に分離できない車両がどの程度存在するのかを確認するため、表-2.4.1 に台数を示す分析対象車両の中から分離不能となる車両を抽出した。その結果、図-2.4.16 に示す最遠軸距が 22.0m 以上である５軸車と３軸トラクタに１軸のトレーラを組み合わせた４軸車の２通りが適切に判別できなかった。しかしながら、これらの車両は極めて稀なケースであると考えられ、本アルゴリズムは実用上必要な精度が確保されていると判断した。

なお、当システムによる車両重量計測において、通行車両のビデオ撮影する等により、直接確認が行える場合には、本アルゴリズムよらず収録される波形データとそれらを対照することでも車種判別が行え、この場合には異常値の検証も容易である。

表-2.4.2　判別アルゴリズムの精度検証結果

車 両	軸 数 (台)	検 証 車 両 計	エ ラ ー 数 (台)	正 解 率
単 車	2	118		100.0%
	3	118		100.0%
	4	55		100.0%
	5	6		100.0%
	6	4		100.0%
	合 計	301		100.0%
セ ミ ト レ ー ラ	3	29		100.0%
	4	138	9	93.5%
	5	76	1	98.7%
	6	32		100.0%
	合 計	275		100.0%
フ ル ト レ ー ラ	5	20		100.0%
	合 計	20		100.0%
合 計		596	10	98.3%



(a) ４軸セミトレーラ　　(b) ５軸セミトレーラ

図-2.4.16　判別不能な車両の例

2.5　車両重量の算出

（1）事前計測（影響線の算出）

事前計測は、荷重車を用いて、対象橋梁毎に主桁ひずみの影響線をあらかじめ算出しておくための計測である。影響線算出の方法は以下に示す通りである。

図-2.5.1 に示すように、橋梁を両端単純支持の一本のはりであるとすると、荷重入力Pに対する主桁ひずみの応答値は、以下のように表される。

$$\varepsilon(x) = \frac{\sigma}{E} = \left(\frac{y'}{EI}\right) M(x) = \frac{y'}{EZ} \cdot P\frac{x'}{2} \qquad \text{（式1）}$$

ここに、　ε ：ひずみの応答値

y’：中立軸から下フランジまでの距離

Z ：主桁の断面係数

EI：主桁の曲げ剛性

x ：位置

$$M(x) = P \cdot \frac{x'}{2} \qquad \text{（式2）}$$

x’：集中荷重 P の位置（床版のひずみ応答で算出）

$$\begin{cases} x' = x & \left(0 \leqq x \leqq \frac{L}{2}\right) \\ x' = L - x & \left(\frac{L}{2} \leqq x \leqq L\right) \end{cases}$$

ここに、　L：スパン長（m）

実際の橋梁は、奥行き方向に複数の車線や主桁を有しており、各車線に対応した主桁にひずみゲージを設置している当システムでは、主桁の断面係数Z、曲げ剛性EIといった諸量は、測定橋梁毎、車線毎に、橋梁構造、ゲージ貼り付け位置などの条件に応じて固有の値が定まることとなる。ここで、荷重車の軸数がｎ、橋梁の車線数をｍとすると、ｋ車線に設置したひずみゲージの位置に生じるひずみはε_kは、各軸重P_{ik}により生じるひずみ$\varepsilon_i(x_i)$の計算値の重ね合わせで(式3)のように表すことができる。

$$\varepsilon_k(x) = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i(x_i) = EZ_k \sum_{i=1}^{n} \left(P_{ik}\frac{x'_i}{2}\right) \qquad \text{（式3）}$$

そして、(式4)に示すように各車線毎に荷重車の各軸分を重ね合わせたひずみの計算値ε_kと荷重車走行時のひずみの実測値d_kとの差が最小となるように連立方程式を作成し、ひずみの影響線を設定する。

$$
\left.
\begin{aligned}
s_1(x) &= \sum_{k=1}^{m} \{ \varepsilon_k(x, P_{ik}, EZ_k) - d_1(x) \} && \rightarrow \text{最小} \\
s_2(x) &= \sum_{k=1}^{m} \{ \varepsilon_k(x, P_{ik}, EZ_k) - d_2(x) \} && \rightarrow \text{最小} \\
&\cdots\cdots \\
s_k(x) &= \sum_{k=1}^{m} \{ \varepsilon_k(x, P_{ik}, EZ_k) - d_k(x) \} && \rightarrow \text{最小}
\end{aligned}
\right\} \quad \text{（式4）}
$$

EZ_k：車線Kに対応した主桁の影響線

P_{ik} ：車線Kにおけるi番目の軸重

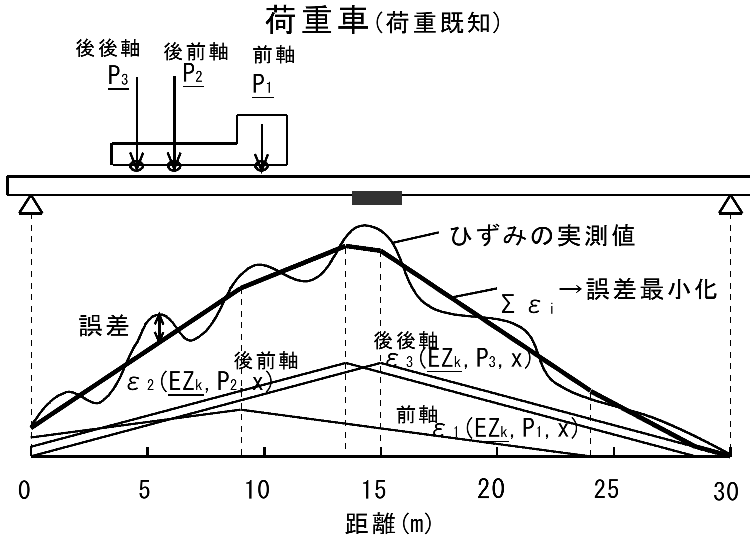


図-2.5.1　ひずみの実測値と理論波形

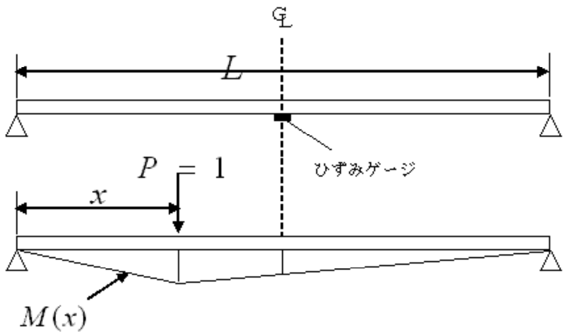


図-2.5.2　曲げモーメントの算出

（2）本計測（一般車両の重量算出）

重量が未知の一般車両については、未知の重量P_{ik}を荷重車を用いて求めた主桁のひずみの計算値$\varepsilon_k(x)$と、ひずみの実測値$d_k(x)$との誤差$s_k(x)$が最小となるように車線毎に未知の軸重P_{ik} を計算する。

この考え方は、橋梁上に存在する車両数に関係なく適用される。橋梁上に存在する全ての車軸の軸重を上記計算で求めておき、車種判別アルゴリズムにより分離された車両ごとに軸重を合計して総重量が求められる。また、同一方向に複数の車線を有する道路の場合、誤差最小化の計算は、各車線に対応した主桁ひずみのデータを用いて、車線毎に行い、当該車線を走行した車両の重量計算結果を出力する。

なお、計算は車両間の走行速度の違いに対応できるよう、（式5）に示すように位置xの代わりに時間tを用いて行う。一般車両の重量算出の考え方を図-2.2.3 に示す。

$$s_1(t)=\sum_{k=1}^{m}\{\varepsilon_k(t_i,\ P_{ik},\ EZ_k)-d_1(t)\}\quad\rightarrow\text{最小}$$

$$s_2(t)=\sum_{k=1}^{m}\{\varepsilon_k(t_i,\ P_{ik},\ EZ_k)-d_2(t)\}\quad\rightarrow\text{最小}\qquad\text{（式5）}$$

・・・・・・

$$s_k(t)=\sum_{k=1}^{m}\{\varepsilon_k(t_i,\ P_{ik},\ EZ_k)-d_k(t)\}\quad\rightarrow\text{最小}$$

測定対象車（荷重未知）

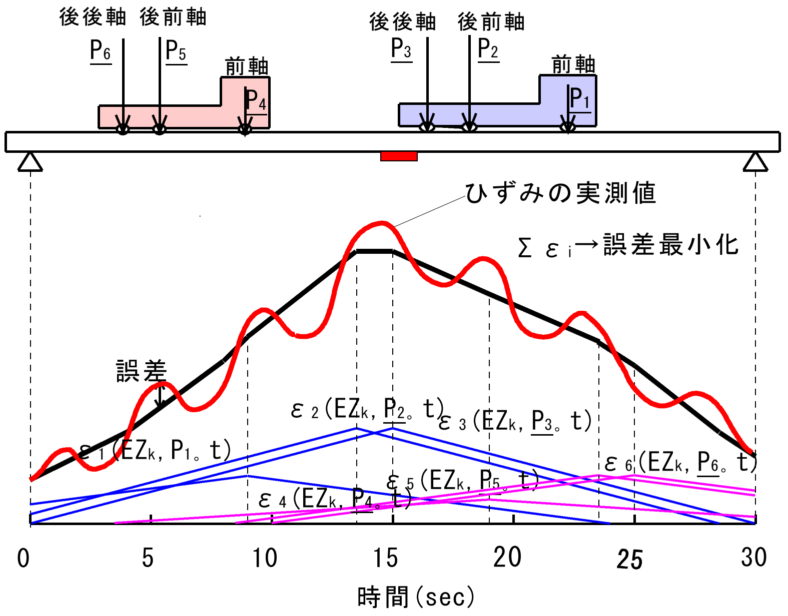


図-2.5.3 重量算出の考え方

2.6 各種の処理

2.6.1　ノイズの処理

橋梁部材の応答波形には、自動車荷重以外の外乱による振動や電波無線の影響など、様々なノイズが混入し、それらが算定結果に大きな影響を及ぼすことがある。特に、応答時間の短い部材の応答を用いる車軸の特定においては、車軸による応答とノイズとを混同することがあり注意が必要である。

そのため、当システムで記録されたひずみは、不感帯を設け、一定の値（以下、「不感帯」という）に達しない応答は、処理対象とならないようにしている。不感帯は、部材のひずみ応答波形の特性をふまえ、ノイズの影響を適切に除去できる範囲を設定する必要がある。

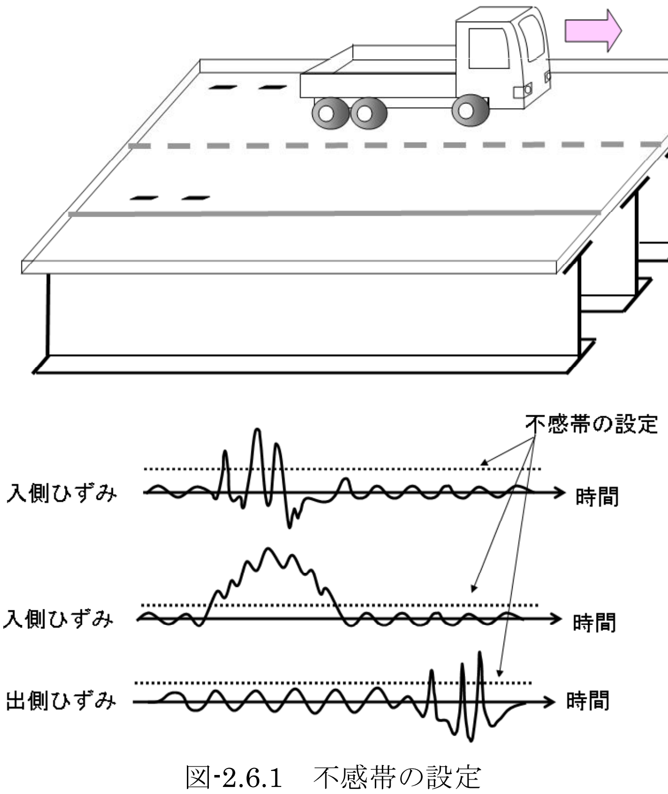


図-2.6.1　不感帯の設定

2.6.2　温度変化に対する処理

鋼桁のひずみ応答を利用して重量算定を行う当システムでは、図-2.6.2 のイメージに示すように、温度変化の影響により、主桁のひずみが変動し、車両重量の算定結果に影響を及ぼす場合がある。そのため、当システムでは無載荷状態における主桁のひずみが、常に０の状態に保たれるように自動的な処理を行っている。

処理の方法は、片側１車線の場合、図-2.6.3 に示すように主桁ひずみの極大点間 a-c の中点 b の前後 0.5 秒の平均値を基線（0 の状態）とする。複数車線の場合は、主桁ひずみの極大点間 a-c の所用時間が 9 秒以上の場所を見つけ、さらにこの区間の中点 b の主桁ひずみが不感帯以下の場合に中点 b の前後 0.5 秒の平均値を基線とする。また、全ての車線の主桁ひずみが不感帯以下の場合は、10 分ごとに記録されるバイナリファイルの先頭から１秒間の平均値を基線とする。

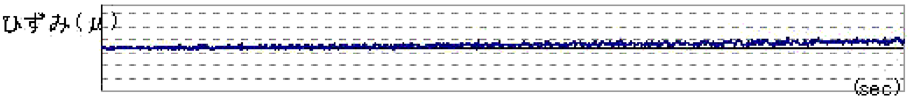


図-2.6.2　温度変化の影響による０点シフトのイメージ

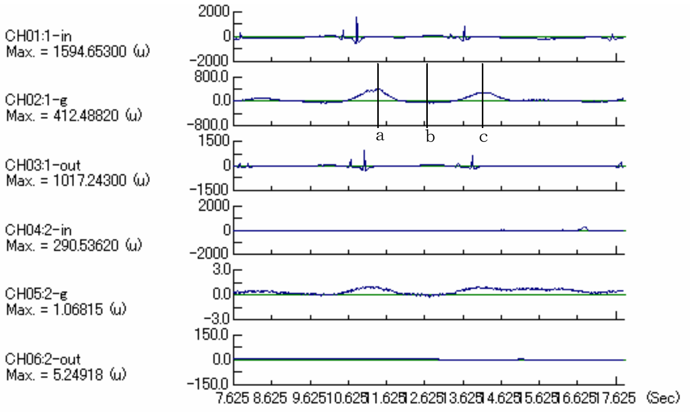


図-2.6.3　主桁下フランジを用いた処理

2.6.3　隣接軸の処理

図-2.6.4 は、軸間距離 1.6m 以下の隣接軸の軸間距離と軸重の関係を、車両諸元表の分析から示したものである。これによると、隣接する車軸の軸重の比率（以下、「軸重比」という）が 1.0 ～ 1.1 の車両が 90%近くを占めていることがわかる。

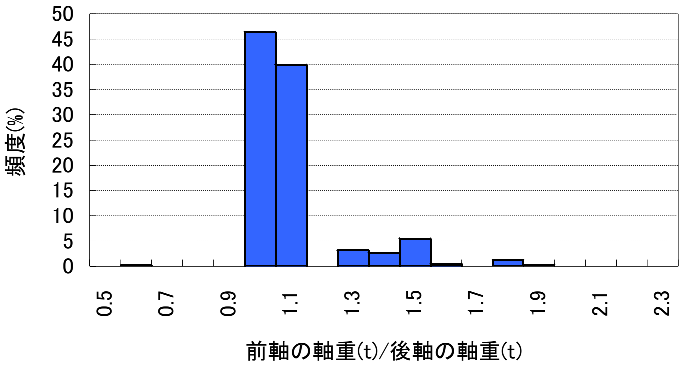


図-2.6.4　軸間距離と軸重の関係

橋梁上に同時載荷される車軸数が多くなると、主桁の応答値から各軸重を算定する過程で、算定精度が低下する可能性が高くなる。そのため、軸間距離が 1.6 m以内のタンデム軸やトリプル軸においては、各軸重を同一とする仮定を設けた。

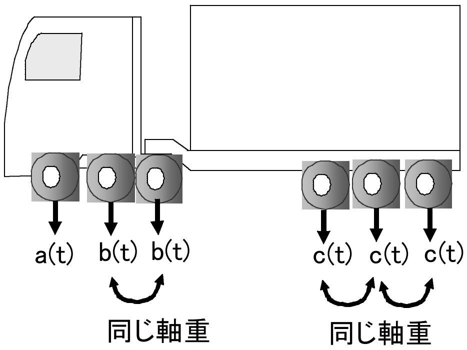


図-2.6.5　隣接軸の処理

2.6.4　低速走行車両の処理

渋滞時は、加速・減速に伴う走行速度の変化が頻繁に発生する。当システムでは、橋梁上を一定速度で通過すると仮定して計算を行っているため、渋滞時には、算定精度が低下する可能性がある。そのため、渋滞時には重量計算を行わず適用範囲外としている。

当システムでは、一台の車両が橋梁に進入してから通過するまでに 10 秒以上を要する場合と定義した。例えば、橋長 30m の橋梁の場合、10.8km/h(=30m/10s×3600/1000)以下になると、渋滞とみなし重量計算は実施しない。

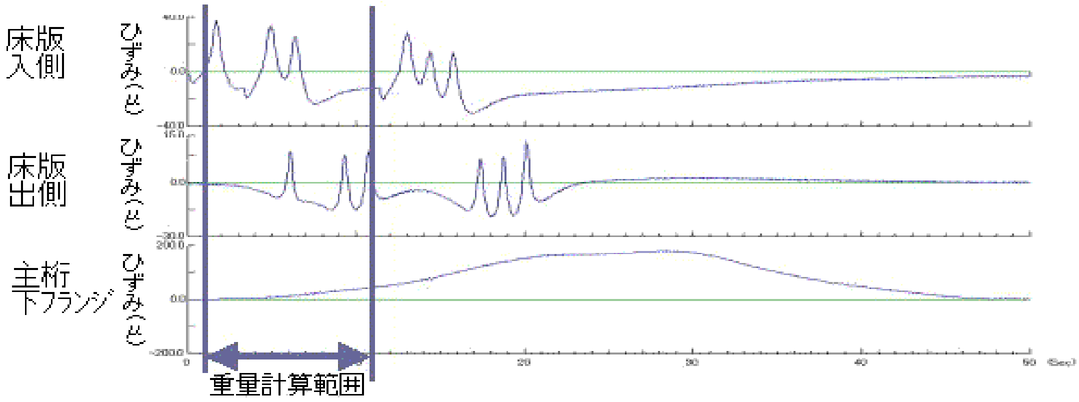


図-2.6.6(1)　渋滞時の波形の例

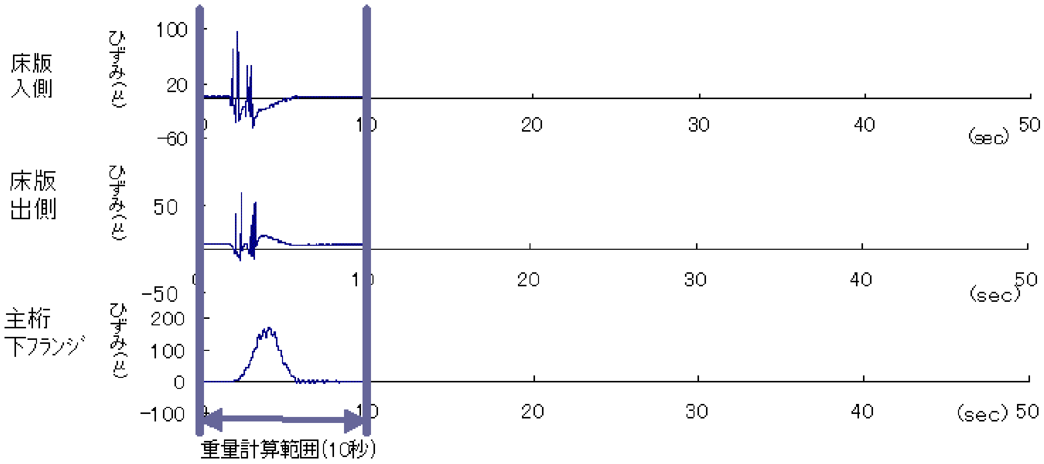


図-2.6.6(2)　時速 40km の波形の例

３章　ＢＷＩＭシステムの適用性に関する調査

3.1　調査項目

橋梁部材の応答から車両重量を測定する手法に関しては、橋梁部材応答の特性、算定上の仮定などが、手法の算定精度や適用範囲に大きな影響を及ぼす。ここでは、様々な車両走行条件、橋梁構造条件に対して、算定精度および適用条件に関する調査を実施した。

表-3.1.1 に当システムの算定精度に対する影響要因、表-3.1.2 にここで実施した一連の試験ケースの一覧、表-3.1.3 に試験で使用した橋梁の諸元、表−3.1.4 に試験で使用した車両の諸元、図-3.1.1 に試験車両の概要、図-3.1.2 に走行パターン、図-3.1.3 に各橋梁の測定位置を示す。

表-3.1.1　算定精度に対する影響要因

基本条件	【車両条件】 ・一般的諸元を有する６軸までの大型車 【橋梁条件】 ・ＲＣ床版を有する鋼単純鈑桁橋 【計測条件】 ・主桁支間中央、橋梁入口部床版下面 （算定アルゴリズムの構築、機器の構成上、標準とした条件）	
影響要因	【車両条件】 ・軸数 ・走行位置 ・走行速度 ・車両振動の大小 ・連行、並走の有無 【橋梁条件】 ・主桁材料 ・主桁形式 ・荷重分配 ・単純・連続の別 ・直橋・斜橋の別 ・支間長 ・床版支間 【計測条件】 ・主桁の計測位置 ・床版の計測位置	【影響理由】 未知数の増大 床版のひずみ波形の変化 主桁のひずみ波形の変化 主桁のひずみ波形の変化 未知数の増大 主桁のひずみ波形の変化 床版、主桁のひずみ波形の変化 主桁のひずみ波形の変化 主桁のひずみ波形の変化 主桁のひずみ波形の変化 未知数（同時載荷確率）の増大

表-3.1.2 試験ケース

検証項目		橋梁条件:橋梁名	支持条件	主桁	床版	斜角	車線	交通条件:車両No.	パターン走行	速度(km/h)	走行位置	主桁計測位置
基本のケース		試験橋梁	単純	鋼	RC	90°	2	T25	単独	40	ずれなし	L/2
橋梁条件	橋梁形式	福岡橋	連続	鋼	RC	90°	片側2	T15b	単純	40	ずれなし	L/2
								T20f				
								Tr35b				
		北陸橋	単純	鋼箱	RC	84°	片側1	T15b				
								T20f				
								Tr35b				
		岩屋高架橋	連続	PCT	RC(間詰め)	74°	片側3	T20d				
	斜角	試験橋梁	単純	鋼	RC	90°	2	T15a	単独	40	ずれなし	L/2
								T25				
		蓮沼橋	単純	鋼	RC	60°	片側2	T20c	単純	40	ずれなし	L/2
		住吉川橋	単純	鋼	RC	74°	片側2	T20e	単純	40	ずれなし	L/2
車両走行条件	車両軸数の違い	試験橋梁	単純	鋼	RC	90°	2	T15a	単独	40	ずれなし	L/2
								T25				
								Tr35a				
								Tr42a				
								Tr42a				
								Tr45				
	連行・並走	試験橋梁	単純	鋼	RC	90°	2	T15a	単独	40	ずれなし	L/2
								T25				
								T15a/T25	完全並走	20		
									50%並走			
									連行並走			
									連行	10		
		福岡橋	連続	鋼	RC	90°	片側2	T15b	単独	40	ずれなし	L/2
								T20f				
								T15b/T20f	完全並走			
									連行並走			
									連行			
	走行速度の違い	試験橋梁	単純	鋼	RC	90°	2	T15a	単独	20	ずれなし	L/2
								T25		20		
										30		
										40		
								T35a		40		
										80		
	走行位置のずれ	試験橋梁	単純	鋼	RC	90°	2	Tr35a	単独	80	ずれなし	L/2
								Tr45				
								Tr35a			500mmずれ	
								Tr45				
ひずみゲージ貼付条件		試験橋梁	単純	鋼	RC	90°	2	T15a	単独	40	ずれなし	L/2
								T25				
								T15a				L/4
								T25				
								T15a				L/8
								T25				
		福岡橋	連続	鋼	RC	90°	片側2	T15b	単独	40	ずれなし	L/2
								T20f				
								T15b				L/4
								T20f				
								T15b				L/8
								T20f				

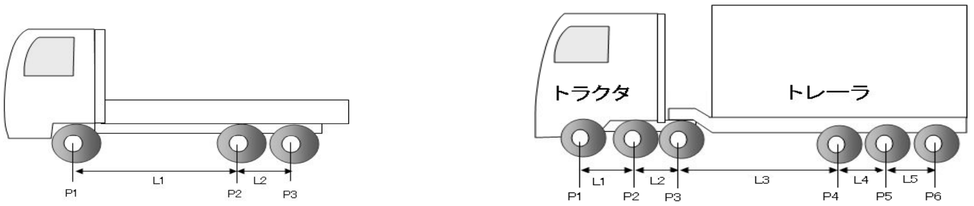
注）表中網掛け部が比較対照の着目条件項目

表-3.1.3　橋梁緒元

項目		試験橋梁	福岡橋	北陸橋	岩屋高架橋	住吉川橋	芦屋川橋	甲子橋	小山高架橋	蓮沼橋
橋梁諸元	単純・連続の別	単純	連続	単純	連続	単純	連続	単純	連続	単純
	桁形式	鈑桁橋	鋼鈑桁	鋼箱桁	PCT桁橋	鈑桁橋	鈑桁橋	鋼鈑桁	鋼鈑桁	鋼鈑桁
	床版形式	コンクリート床版	コンクリート床版	コンクリート床版	コンクリート床版	コンクリート床版	コンクリート床版	コンクリート床版	コンクリート床版	コンクリート床版
	支間長(m)	30.0	40.9	53.4	21.4	24.0	33.4	27.6	27.6	30.3
	車線	2車線	片側2車線	片側1車線	片側3車線	片側3車線	片側3車線	片側2車線	片側2車線	片側2車線
		車線数変化なし	車線数変化なし	車線数変化なし	車線数変化なし	車線数変化なし	車線数変化なし	車線数変化なし	車線数変化なし	車線数変化なし
	斜角(度)	90	82	84	74	74	96	90	90	60
	主げた	著しい変断面なし	著しい変断面なし	著しい変断面なし	著しい変断面なし	著しい変断面なし	著しい変断面なし	著しい変断面なし	著しい変断面なし	著しい変断面なし
交通条件	大型車交通量 (台/日/方向)	-	2500	-	7500	7000	10000	10000	6500	1500
	車線変更	-	頻繁に生じない	生じない	頻繁に生じない	頻繁に生じない	頻繁に生じない	頻繁に生じる	頻繁に生じない	頻繁に生じない
	速度変化	-	要因なし	要因あり (信号・勾配)	要因なし	要因なし	要因あり (信号)	要因あり (信号)	要因なし	要因なし
橋梁の状態	主げた	著しい錆等はなし	著しい錆等はなし	著しい錆等はなし	著しい錆等はなし	著しい錆等はなし	著しい錆等はなし	著しいさび等なし	著しいさび等なし	著しいさび等なし
	床版	ひび割れや漏水は少ない	ひび割れや漏水は少ない	ひび割れや漏水は少ない	ひび割れや漏水は少ない	ひび割れや漏水は少ない	ひび割れや漏水は少ない	ひび割れや漏水は少ない	ひび割れや漏水は少ない	ひび割れや漏水は少ない
		鋼板接着などによる補修なし	鋼板接着などによる補修なし	鋼板接着などによる補修なし	鋼板接着などによる補修なし	鋼板接着などによる補修なし	鋼板接着などによる補修なし	鋼板接着による補修無し	鋼板接着による補修無し	鋼板接着による補修無し
	支承	著しい損傷なし	著しい損傷なし	著しい損傷なし	著しい損傷なし	著しい損傷なし	著しい損傷なし	著しい損傷なし	著しい損傷なし	著しい損傷なし
路面の状態	伸縮装置	車両進入側で著しい不連続となっていない	車両進入側で著しい不連続となっていない	車両進入側で著しい不連続となっていない	車両進入側で著しい不連続となっていない	車両進入側で著しい不連続となっていない	車両進入側で著しい不連続となっていない	車両進入側で著しい不連続となっていない	車両進入側で著しい不連続となっていない	車両進入側で著しい不連続となっていない
	舗装表面	著しい凹凸なし	段差有り(車両進入側)	著しい凹凸なし	著しい凹凸なし	著しい凹凸なし	著しい凹凸なし	著しい凹凸なし	著しい凹凸なし	著しい凹凸なし
その他	計測作業上の条件	1)床版下面、主げた下面へのゲージ貼付が可能	1)床版下面、主げた下面へのゲージ貼付が可能	1)床版下面、主げた下面へのゲージ貼付が可能	1)床版下面、主げた下面へのゲージ貼付が可能	1)床版下面、主げた下面へのゲージ貼付が可能	1)床版下面、主げた下面へのゲージ貼付が可能	1)床版下面、主げた下面へのゲージ貼付が可能	1)床版下面、主げた下面へのゲージ貼付が可能	1)床版下面、主げた下面へのゲージ貼付が可能
		2)データ収録機器等までの配線および機器類の配置が可能	2)データ収録機器等までの配線および機器類の配置が可能	2)データ収録機器等までの配線および機器類の配置が可能	2)データ収録機器等までの配線および機器類の配置が可能	2)データ収録機器等までの配線および機器類の配置が可能	2)データ収録機器等までの配線および機器類の配置が可能	2)データ収録機器等までの配線および機器類の配置が可能	2)データ収録機器等までの配線および機器類の配置が可能	2)データ収録機器等までの配線および機器類の配置が可能
事前計測	試験車両	T25	T20f	T20f	T20e	T20d	T20g	T20a	T20b	T20c

表-3.1.4　試験車両諸元

車種	車両No.		軸数	総重量	軸　重（t）						軸　距（m）				
				(t)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	L1	L2	L3	L4	L5
トラック	T15	a	3	14.10	5.14	4.48	4.48	−	−	−	3.20	1.30	−	−	−
		b	3	15.13	5.13	5.00	5.00	−	−	−	3.20	1.30	−	−	−
	T20	a	3	20.00	5.62	7.19	7.19				3.20	1.30			
		b	3	20.01	5.92	7.05	7.05				3.20	1.30			
		c	3	20.15	5.45	7.35	7.35				3.20	1.30			
		d	3	20.56	5.02	9.58	6.01	−	−	−	3.20	1.30	−	−	−
		e	3	20.71	5.15	9.68	5.88	−	−	−	3.20	1.30	−	−	−
		f	3	21.15	5.27	7.94	7.94	−	−	−	3.20	1.30	−	−	−
		g	3	21.41	4.85	9.58	5.98	−	−	−	3.20	1.30	−	−	−
	T25		3	25.01	6.29	9.36	9.36	−	−	−	3.20	1.30	−	−	−
トラクタ＋トレーラ	Tr35	a	4(2+2)	33.62	6.35	9.03	9.55	8.70	−	−	3.16	8.14	1.50	−	−
		b	4(2+2)	35.39	6.28	9.98	9.33	9.81	−	−	3.18	7.79	1.30	−	−
	Tr42	a	5(2+3)	41.81	6.80	11.33	8.54	8.10	7.03	−	3.60	7.21	1.32	1.32	−
		b	5(2+3)	42.05	6.70	11.52	6.00	7.84	9.99	−	3.18	7.25	1.32	1.32	−
	Tr45		6(3+3)	44.22	5.51	7.10	7.26	6.34	8.66	9.35	2.96	1.30	7.00	1.32	1.32



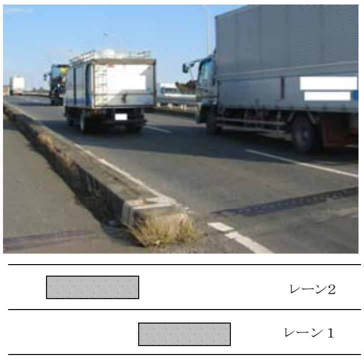
(a) 3 軸トラック　　(b) トラクタ＋トレーラ

図-3.1.1　荷重車の概要

(1)　単独

(2)　並走

(3)　連行



(4)　連行並走

(5)　50%連行並走

図-3.1.2　走行パターン

表-3.1.5　測定位置一覧

番号	種類	設置場所
Gn-L/2	ひずみゲージ	支間の 1/2 地点の Gn 桁下フランジ(n：主桁番号)
Gn-L/4	〃	〃　1/4　〃
Gn-L/8	〃	〃　1/8　〃
m-IN	高感度ひずみ計	ﾚｰﾝ m 走行位置直下の床版橋軸方向ひずみ入側(m:ﾚｰﾝ番号)
m-OUT	〃	〃　出側　〃
2-UP	〃	箱桁上フランジ下面

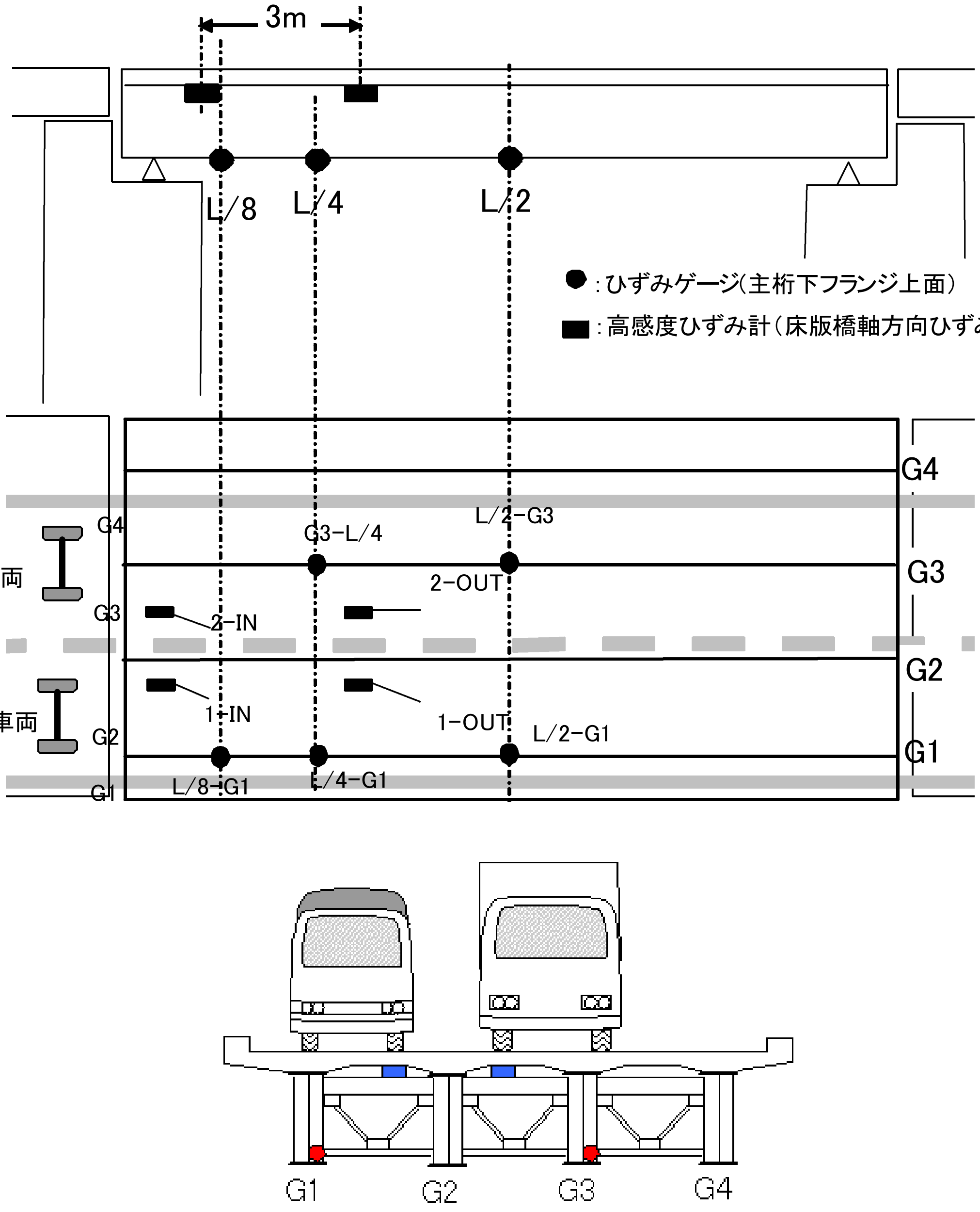
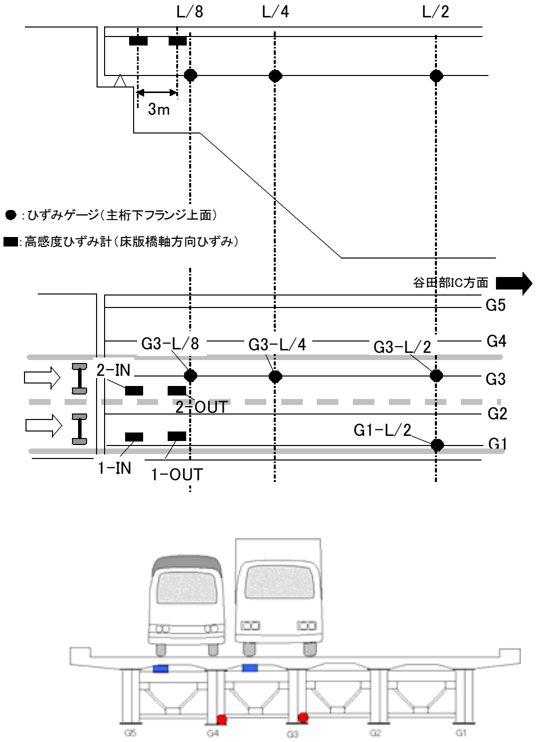
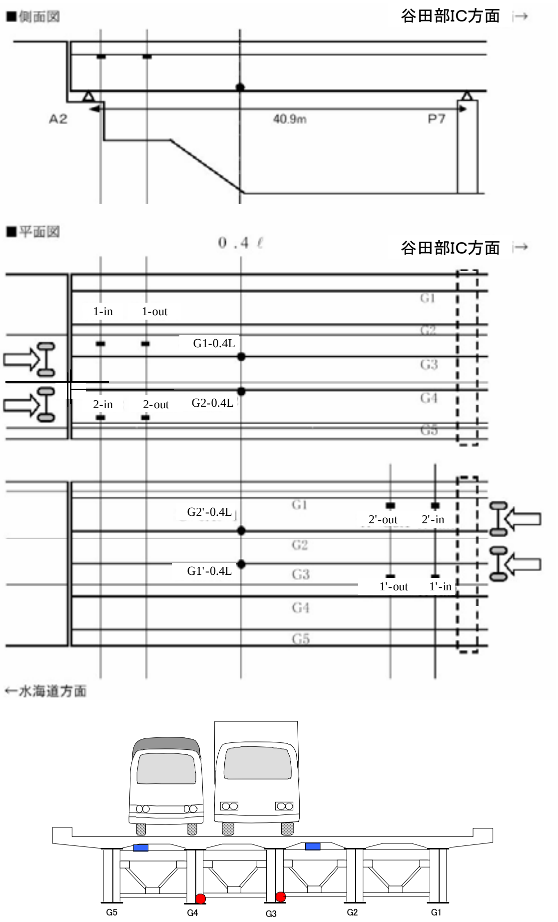


図-3.1.3(1)　計測位置(試験橋梁)

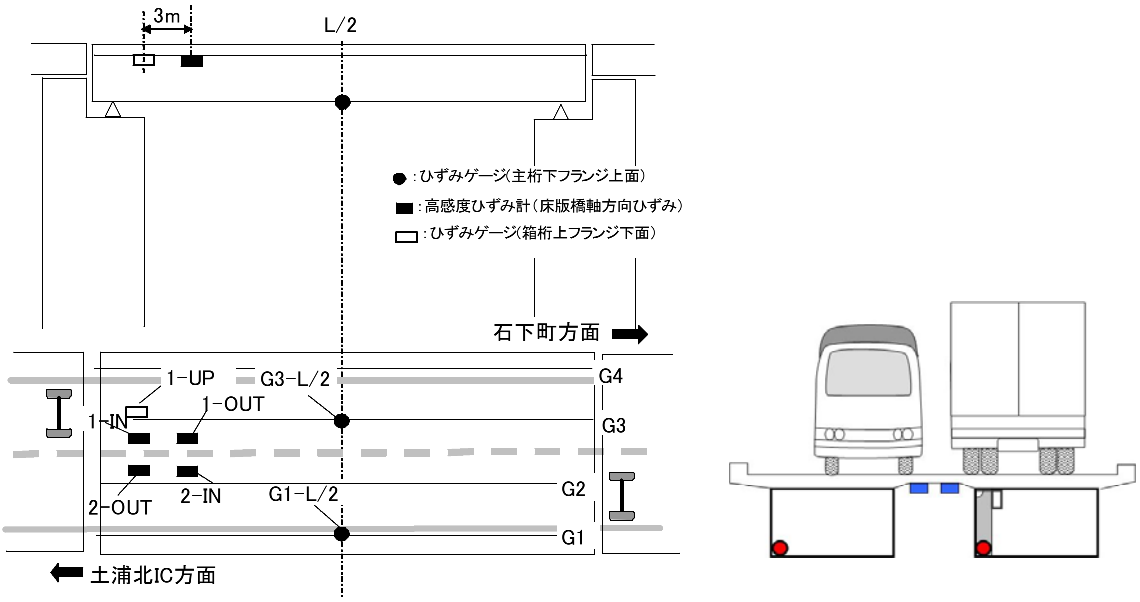




a　計測位置(福岡橋 1 回目)　　　b 計測位置(福岡橋 2 回目)

c　橋梁位置

図-3.1.3(2)　福岡橋



a　測定位置

b　橋梁位置

図-3.1.3(3)　北陸橋

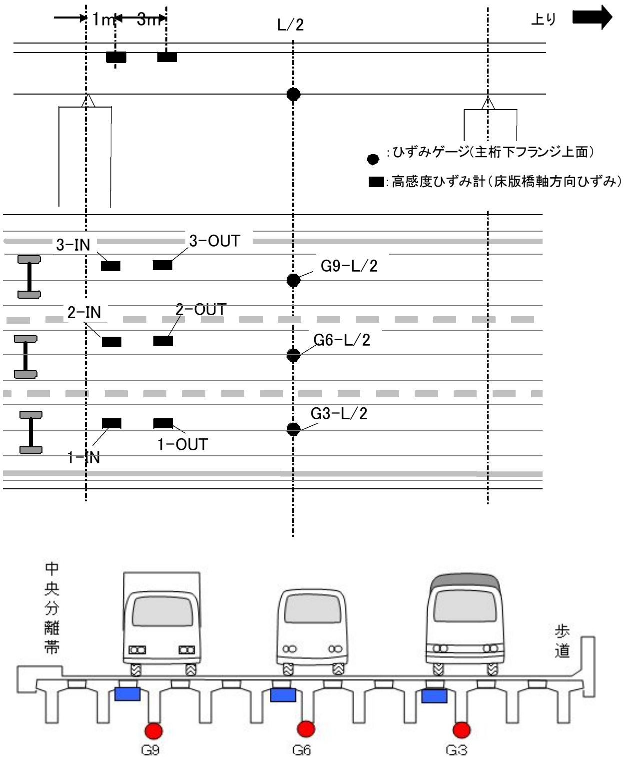


図-3.1.3(4)-a　測定位置(岩屋高架橋)

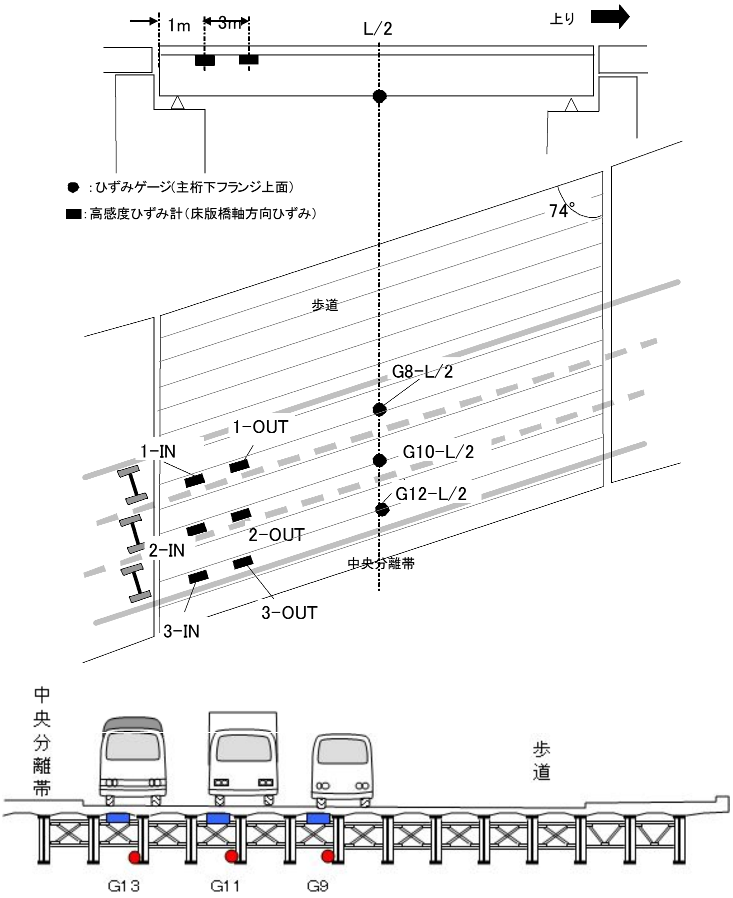


図-3.1.3(5)-a　測定位置(住吉川橋)

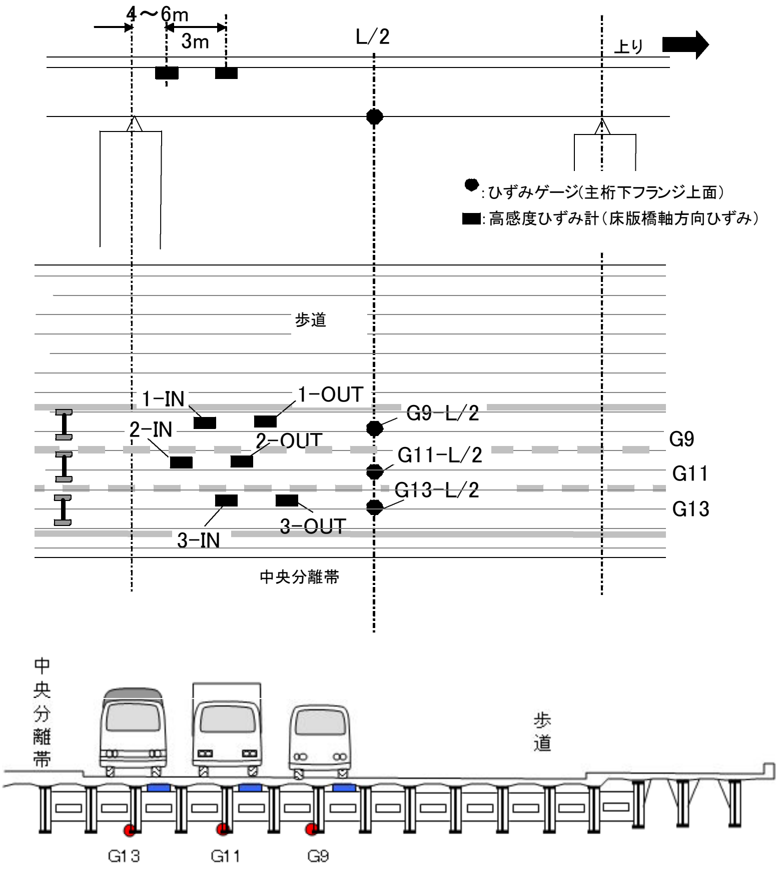
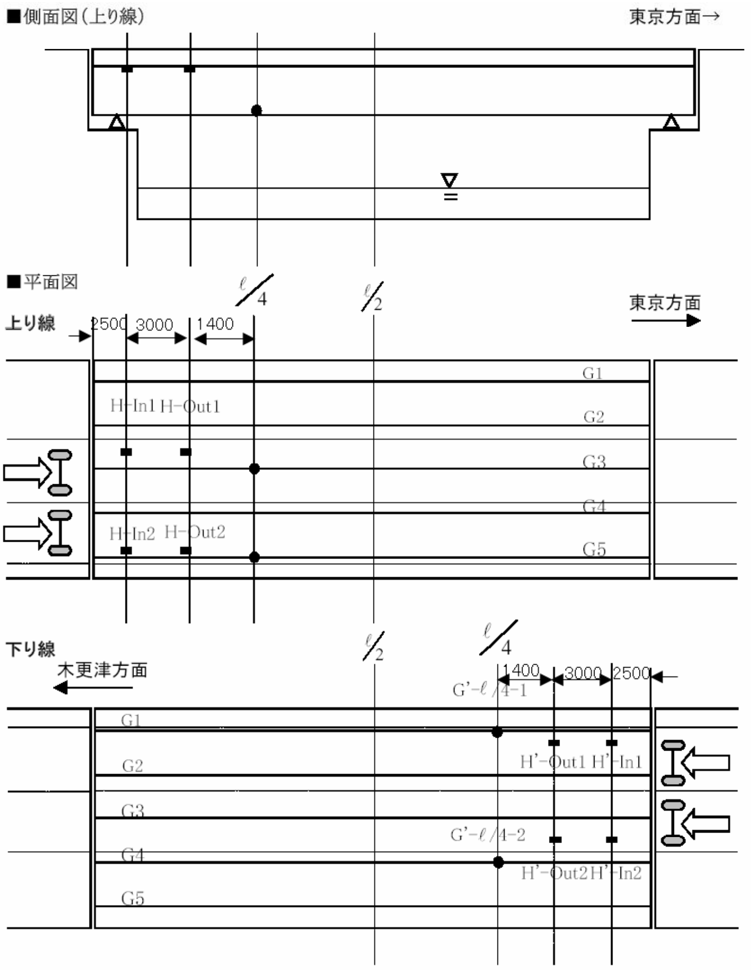


図-3.1.3(6)-a　測定位置(芦屋川橋)

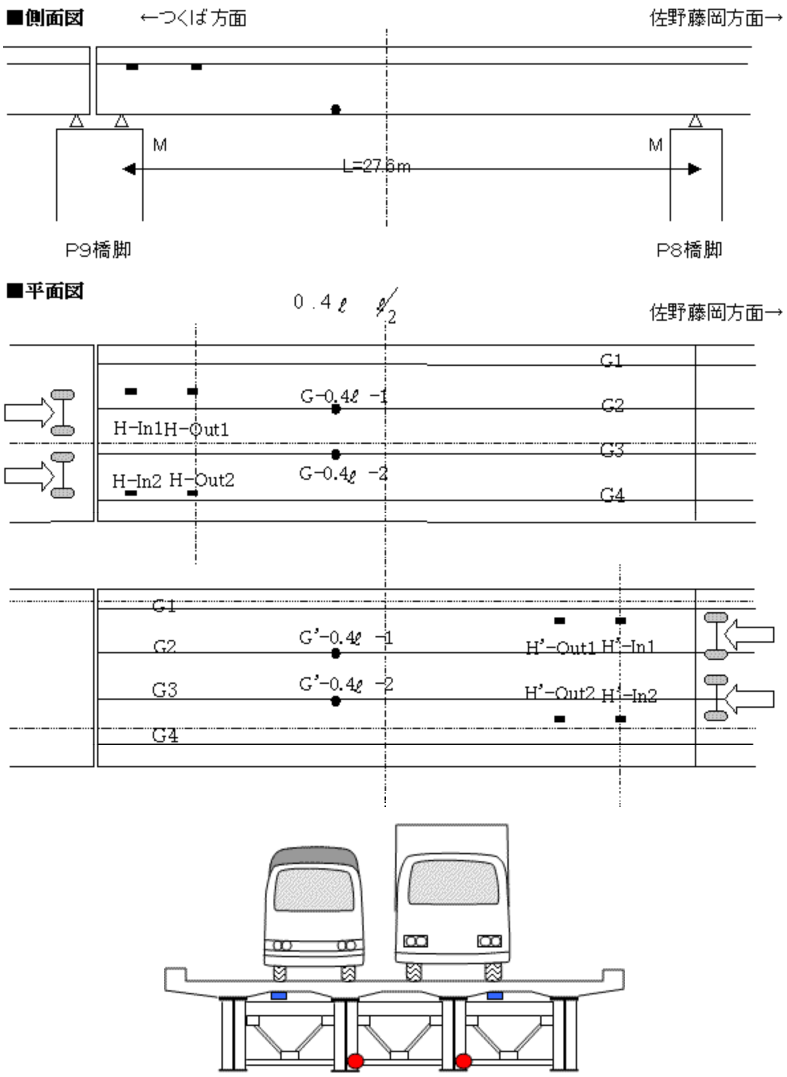
図-3.1.3(4,5,6)-b　橋梁位置(岩屋高架橋、住吉川橋、芦屋川橋)



a　測定位置

b　橋梁位置

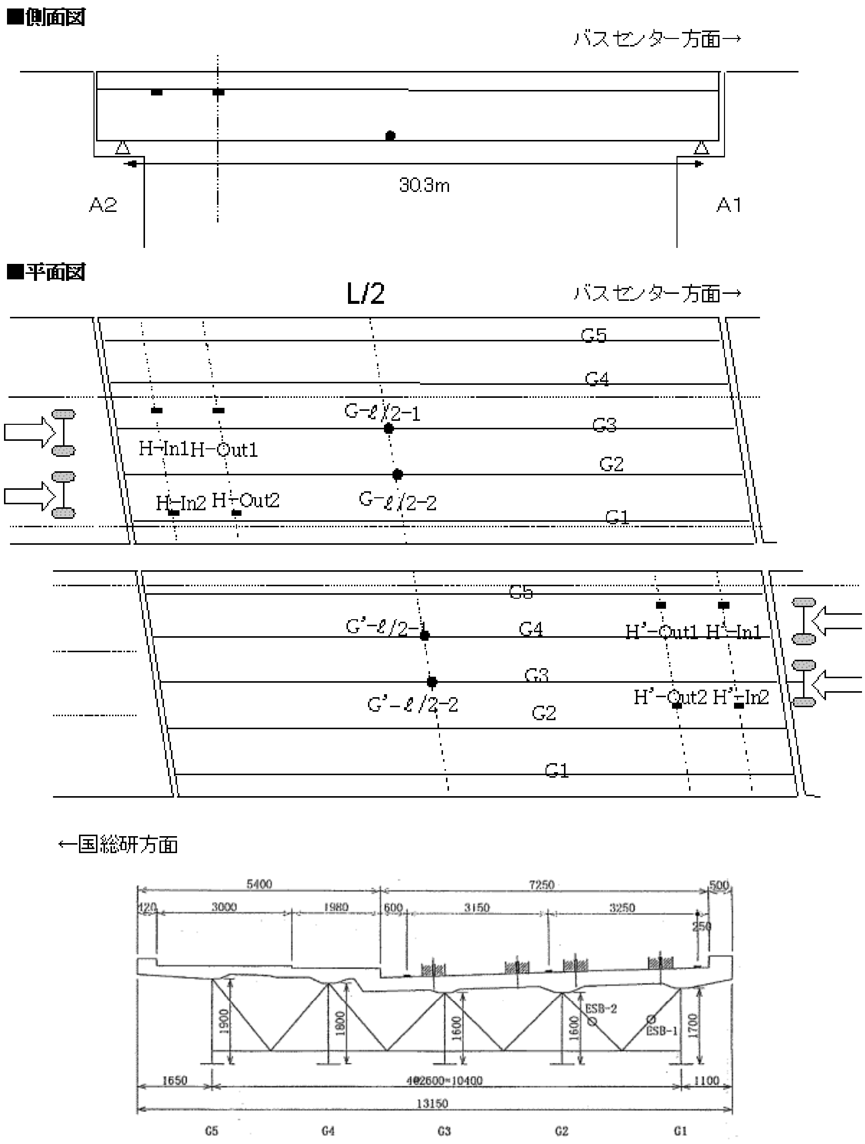
図-3.1.3(7)　甲子橋



a　測定位置

b　橋梁位置

図-3.1.3(8)　小山高架橋



a　測定位置

b　橋梁位置

図-3.1.3(9)　蓮沼橋

3.2　橋梁の条件

3.2.1　単純・連続の違い

表-3.2.1 に、単純桁および連続桁の各着目位置における曲げモーメントの影響線と３軸トラック通過時の曲げモーメントの例を示す。当システムでは、測定に用いる桁が単純桁であると仮定し、主桁のひずみの影響線を一次式で近似している。しかしながら、連続桁の場合は、表-3.2.1 からもわかるように、影響線が一次式にはならず、他径間に存在する車両の影響も受けることから、連続桁に適用する場合には誤差が生じる可能性がある。

表−3.2.1　曲げモーメントの影響線と３軸トラック走行時波形の例

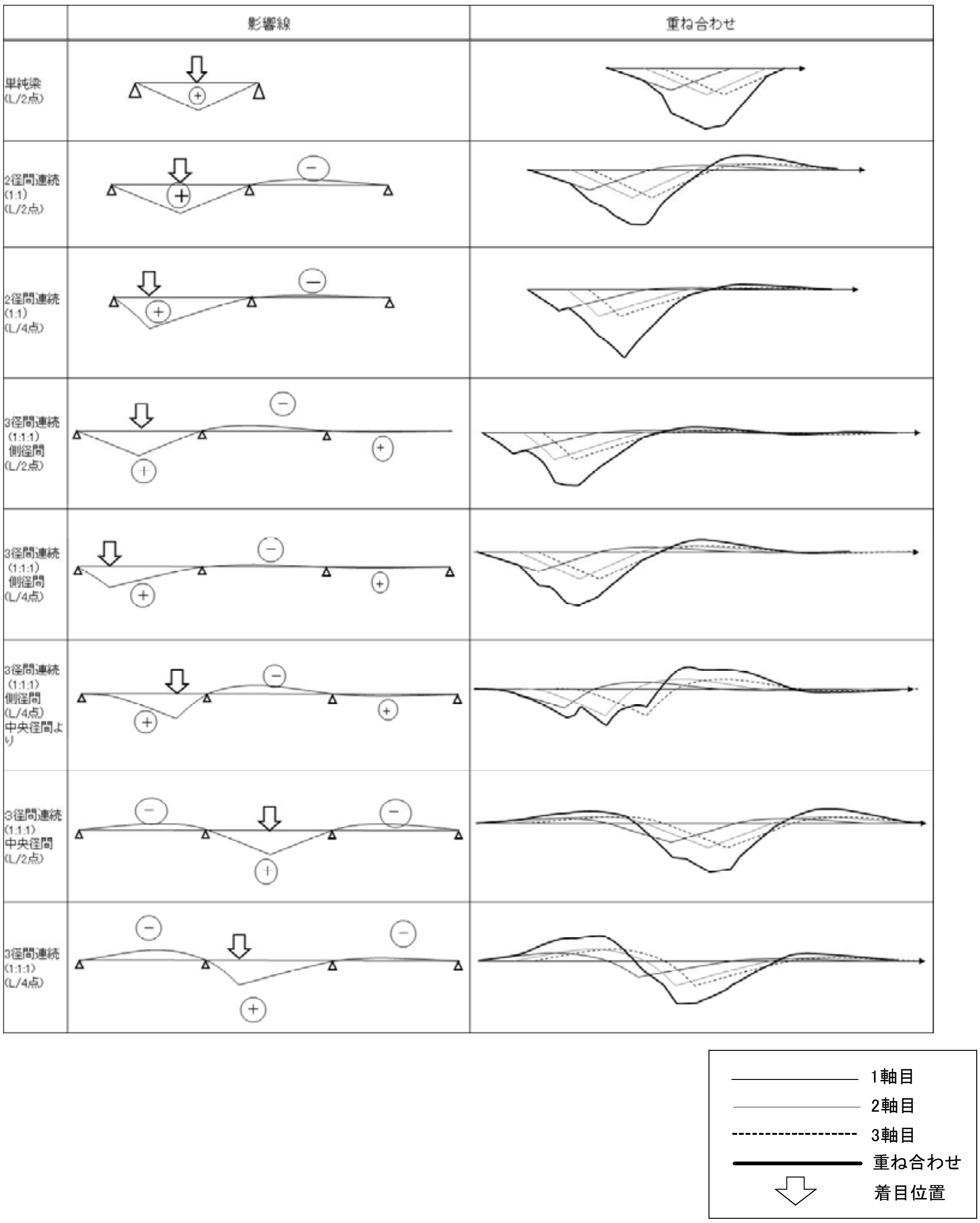
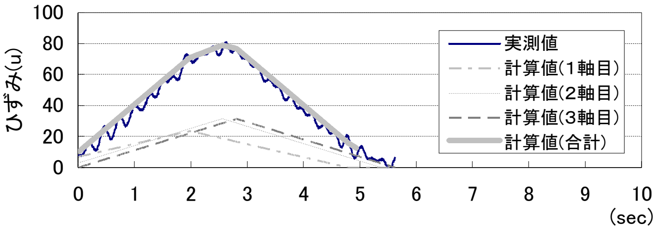
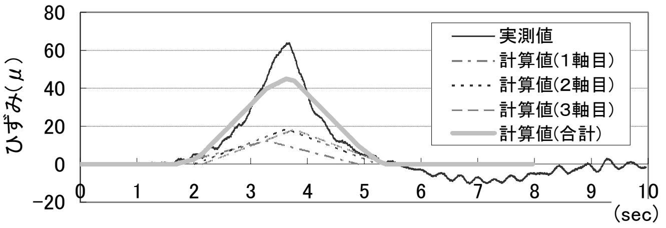


図-3.2.1 には、３軸トラックが単純桁（試験橋梁）および連続桁（福岡橋）を通行した際の主桁のひずみ波形の例を示す。これらの結果より、連続桁の場合、単純桁よりもひずみの実測値と影響線を一次式で近似した当システムでの計算値との相違が大きくなっていることがわかる。



(a)単純桁



(b)連続桁（２径間連続(1:1)L/2 点）

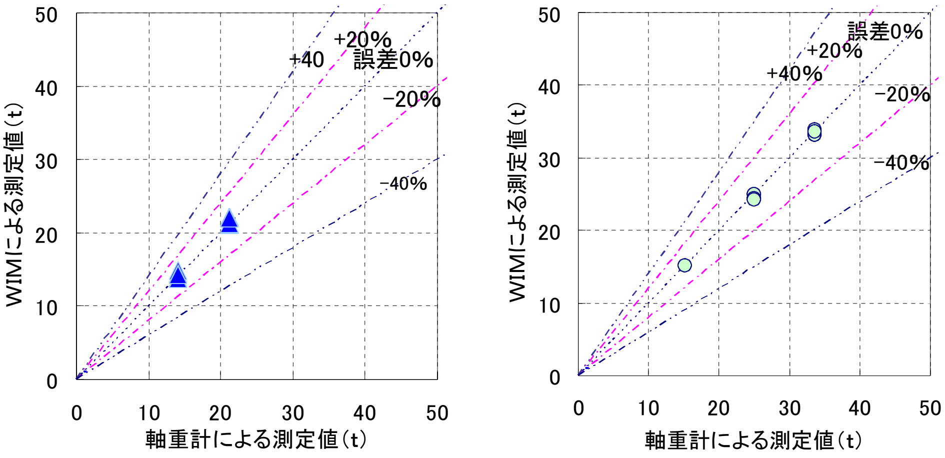
図-3.2.1　主桁のひずみ波形の比較

表-3.2.1 に連続桁（福岡橋）において、3 種類の車両が複数回走行したときの車両総重量、軸重等の測定結果を、図-3.2.2 および図-3.2.3 に、それぞれ総重量および軸重について、本システムによる測定値と軸重計での計量値との関係を示す。これらの結果より、計算に用いる主桁のひずみ波形には、連続桁であることによる計算値の実測値との差が生じていたものの、総重量や軸重の計算結果には、大きな影響を及ぼしていないことがわかった。

したがって、連続橋においても他径間の影響を受けにくい計測位置を選定する等の配慮をすることにより、十分適用が可能であるといえる。

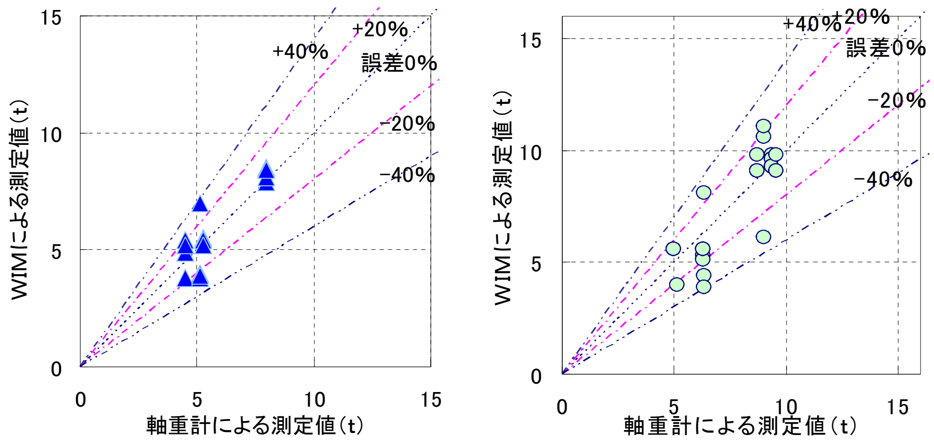
表-3.2.2　連続橋における重量算出結果の例

車両 No.	算出 方法	車　両 総重量（t）	総重量 精度(%)	軸　重（t）				軸間距離(m)		
				P1	P2	P3	P4	L1	L2	L3
T15b	BWIM	14.9	106	4.0	5.4	5.4		3.2	1.4	
		14.5	103	7.0	3.8	3.8		3.1	1.4	
		13.8	98	4.0	4.9	4.9		3.2	1.3	
		13.7	97	3.8	4.9	4.9		3.2	1.2	
		14.3	101	3.9	5.2	5.2		3.2	1.3	
	軸重計	14.10	—	5.14	4.48	4.48		3.2	1.3	
T20f	BWIM	21.2	100	5.5	7.9	7.9		3.2	1.3	
		22.2	105	5.4	8.4	8.4		3.3	1.3	
		22.2	105	5.2	8.5	8.5		3.1	1.4	
		22.0	104	5.2	8.4	8.4		3.2	1.3	
		21.3	101	5.2	8.1	8.1		3.3	1.3	
	軸重計	21.15	—	5.27	7.94	7.94		3.2	1.3	
T35b	BWIM	31.7	90	4.8	6.4	10.3	10.3	3.2	7.8	1.5
		34.3	97	8.5	13.5	6.1	6.1	3.2	7.7	1.5
		27.0	76	9.3	15.1	6.3	6.3	3.2	8.0	1.4
	軸重計	35.387	—	6.28	9.98	9,98	9.81	3.18	7.79	1.3



(a)　連続鈑桁橋(福岡橋)　　(b)　単純鈑桁橋(試験橋梁)

図-3.2.3　総重量精度(単純・連続の別)



(a)　連続鈑桁橋(福岡橋)　　(b)　単純鈑桁橋(試験橋梁)

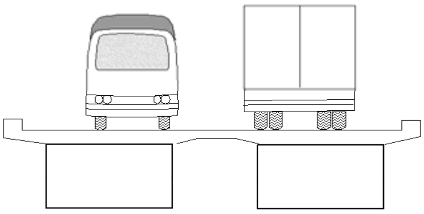
図-3.2.3　軸重精度(単純・連続の別)

3.2.2　主桁形式の違い（I桁・箱桁の別）

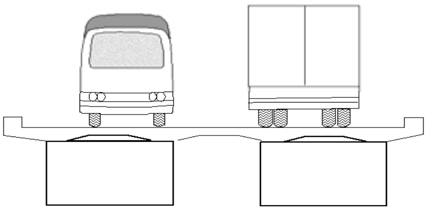
当システムでは、車軸の検出や軸距の算定に、輪荷重直下のＲＣ床版下面橋軸方向のひずみを用いている。したがって、図-3.2.4 の(a)や(b)に示すように、輪荷重直下のコンクリートが露出していない場合には、車軸通過時の床版のひずみ応答の検出が難しく、計測が困難となる可能性があると懸念される。また、箱桁の場合、I 桁と比較して桁全体の剛性が高いため、応答が小さくなる可能性がある。

図-3.2.5 は、同一車両が通過したときの各部材のひずみ応答の例を示したものである。(a)のような RC 床版下での計測では、車軸の通過に伴う明瞭なピークが取得されるが、このように、隣接する車線を走行する車両との距離が近い位置にひずみゲージを設置した場合、隣接車両の影響が生じる可能性があるので注意が必要である。(b)のように鋼上フランジでの計測では、床版のコンクリートで直接測定した場合と比較して応答量は小さいものの、各車軸毎に独立した応答となっている。そのため、各車軸の検出が可能な場合もあることがわかる。(c)の垂直補剛材上端部では、車軸のピークが明瞭に取得されていないため、この場合、車軸の検知への利用には適さないことがわかる。

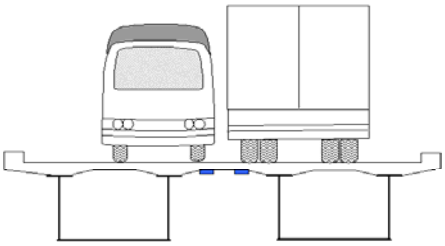
以上のことから、鋼箱桁橋の場合でも計測に適切な部材を選定することにより、十分に適用が可能であることが確認された。図-3.2.7 及び図-3.2.8 に鋼版桁橋及び鋼箱桁橋におけるしたときの車両総重量、軸重の測定結果の比較例を示す。



(a)　桁上フランジに打ち下ろした場合

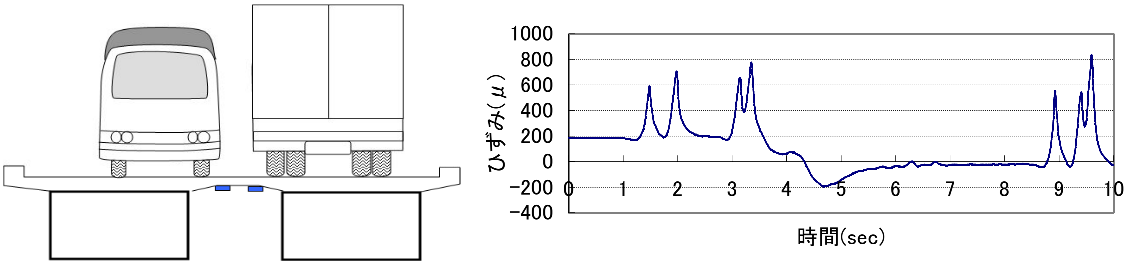


(b)　桁上で埋設型枠の場合

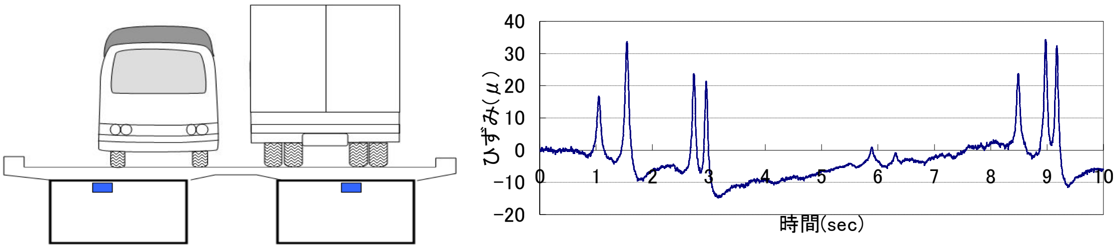


(c)　床版下面が露出している箱桁

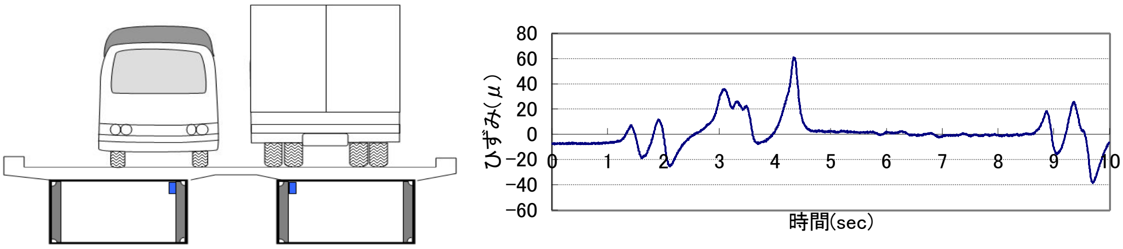
図-3.2.4　箱桁の形式



(a)　RC 床版下面(北陸橋)

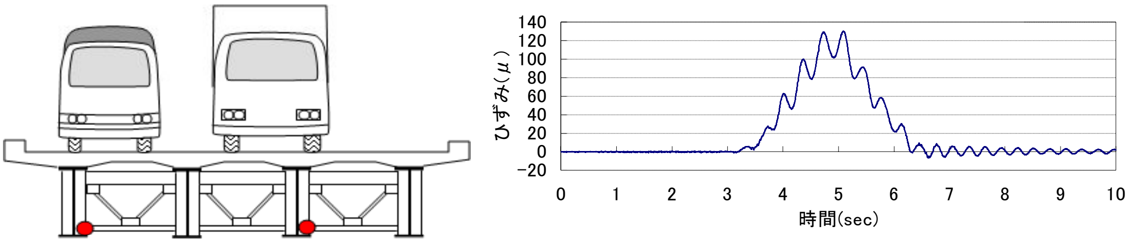


(b)　上フランジ下面(北陸橋)

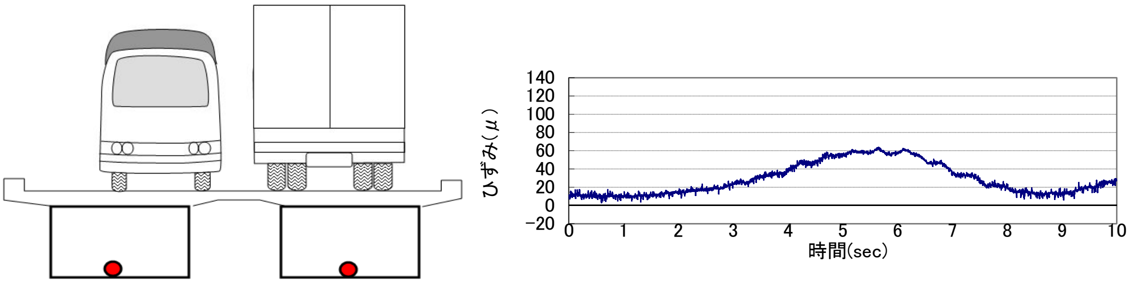


(c)　垂直補剛材上端部(北陸橋)

図−3.2.5　鋼箱桁橋において車両の検知に用いるひずみ



(a)　単純版桁橋主桁下フランジのひずみ(試験橋梁)

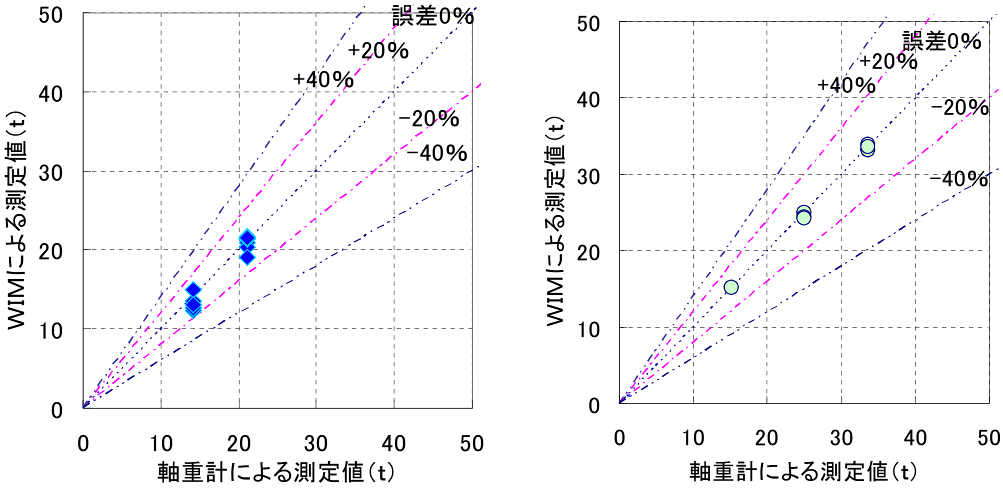


(b)　鋼箱桁橋下フランジのひずみ(北陸橋)

図−3.2.6　鋼箱桁橋において重量計算に用いるひずみ

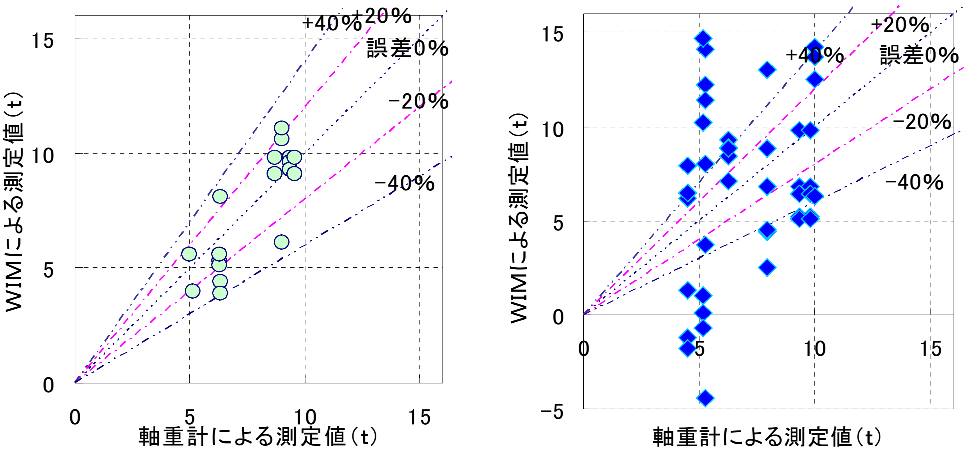
表-3.2.3　鋼箱桁橋の軸重算出精度

車両No.	算出方法	回数	総重量(t)	精度(%)	軸　重(t)			
					P1	P2	P3	P4
T15b	BWIM	1	12.7	90	10.2	1.3	1.3	
		2	12.7	90	16.3	-1.8	-1.8	
		3	12.3	87	14.7	-1.2	-1.2	
		4	13.5	96	1.0	6.2	6.2	
		5	15.0	106	-0.7	7.9	7.9	
		6	13.1	93	0.1	6.5	6.5	
	軸重計		14.10	—	5.14	4.48	4.48	
T20f	BWIM	1	19.1	90	14.1	2.5	2.5	
		2	21.0	99	12.2	4.4	4.4	
		3	20.3	96	11.4	4.5	4.5	
		4	21.3	101	3.7	8.8	8.8	
		5	21.7	103	8.0	6.8	6.8	
		6	21.5	102	-4.4	13.0	13.0	
	軸重計		21.15	—	5.27	7.94	7.94	
T35b	BWIM	1	34.0	96	9.3	14.2	5.2	5.2
		2	32.7	92	8.8	13.7	5.1	5.1
		3	34.6	98	8.4	12.5	6.8	6.8
		4	35.4	100	8.9	13.7	6.4	6.4
		5	33.1	94	7.1	6.3	9.8	9.8
	軸重計		35.387	—	6.28	9.98	9.33	9.81



(a)鋼箱桁橋(北陸橋)　　(b)鈑桁橋(試験橋梁)

図-3.2.7　総重量精度（I桁・箱桁の別）



(a)鋼箱桁橋(北陸橋)　　(b)鈑桁橋(試験橋梁)

図-3.2.8　軸重精度（I桁・箱桁の別）

表-3.2.3 に示すとおり、本計測例では一部で軸重が負と推計されるケースが存在する。これは、本計測で用いた鋼箱桁橋(北陸橋)は、キャンバーが大きい上、信号が近接して存在していたため、速度変化の影響を強く受けている可能性がある。したがって、鋼箱桁橋(北陸橋)の軸重精度については、「3.3.3.2 速度変化」において別途考察する。

3.2.3　主桁材料の違い（鋼・コンクリートの別）

主桁材料がコンクリートの場合、一般に主桁のひずみ応答量が鋼桁の場合よりも小さく、ノイズ等の外乱の影響が相対的に大きくなり、算定精度が低下することが懸念される。しかしながら、図-3.2.9 に示すようにひずみの応答量が鋼桁の場合と大差がない場合もあり、PCT 桁橋（岩屋高架橋）であっても総重量および軸重の算定精度に悪影響を及ぼしていないことが確認できた。

また、床版の支間が小さくかつ桁と一体となっている PCT 桁橋間詰め部（支間 1.06 m）は、鋼桁橋の RC 床版に比べて荷重に対する応答が小さく認識が困難と思われたが、車両がゲージ位置を通過する前後個々の軸に対応するひずみ応答のピーク値の突出は小さくなるものの、車軸の分離や位置の特定は可能であった。

表-3.2.4、図-3.2.10 に総重量の算定結果、図-3.2.11 に軸重の算定結果を示す。

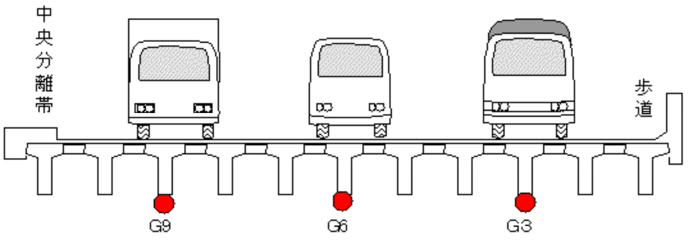
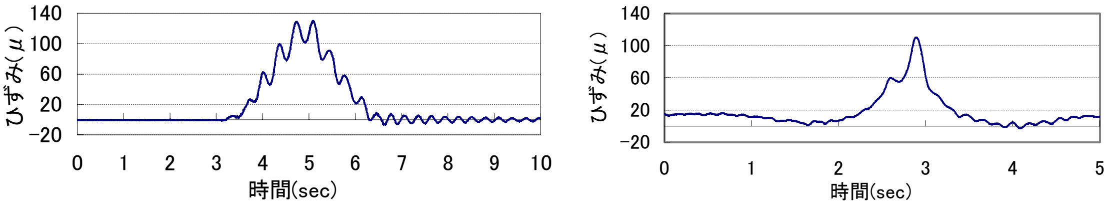
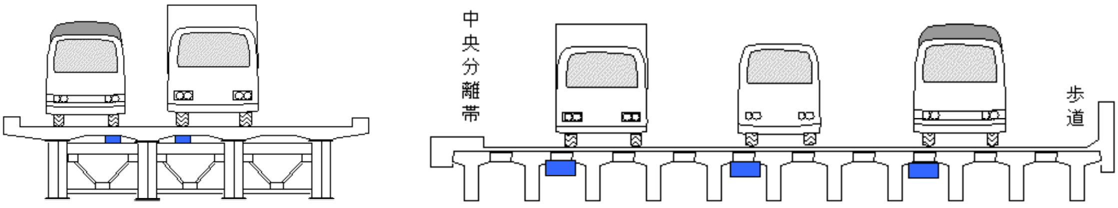


図-3.2.9 コンクリート橋計測位置（主桁）



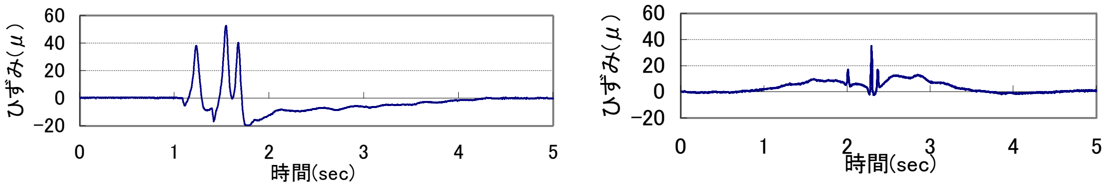
(a)鋼桁（試験橋梁・荷重車 25t）　　(b)PCT 桁（岩屋高架橋・荷重車 20t）

図-3.2.10　鋼桁とコンクリート桁の下フランジのひずみ波形の比較



(a)鋼桁　　(b)　PCT 桁橋間詰め部

図-3.2.11　計測位置（床版）



(a)　RC 床版　　(b)　PCT 桁橋間詰め床版

図-3.2.12　床版下面橋軸方向ひずみ

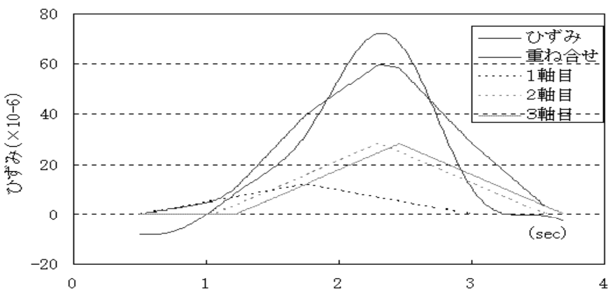
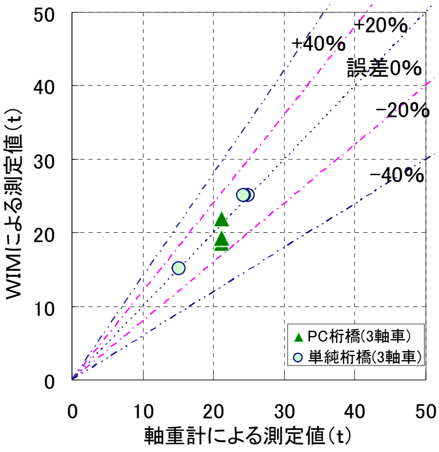


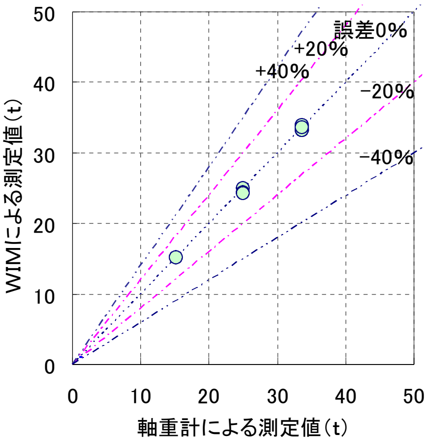
図-3.2.13　計算値と実測値

表-3.2.4　PCT 桁橋重量算出精度

車両 No	計測方法	総重量(t)	精度(%)	軸重(t)		
				P1	P2	P3
T20f	BWIM	18.7	88	3.2	7.7	7.7
		19.2	91	3.6	7.8	7.8
		21.9	104	5.2	8.3	8.3
		19.4	92	2.0	8.7	8.7
	軸重計	21.15	―	5.27	7.49	7.49

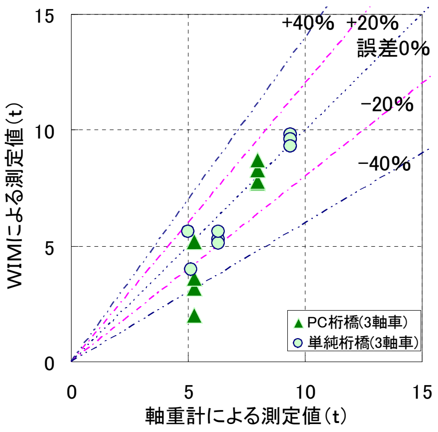


(a)PCT 桁橋(岩屋高架橋)

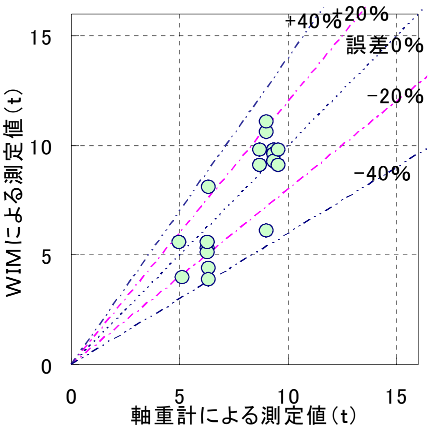


(b)鈑桁橋(試験橋梁)

図-3.2.13　総重量精度



(a)PCT 桁橋(岩屋高架橋)



(b)鈑桁橋(試験橋梁)

図-3.2.14　軸重精度

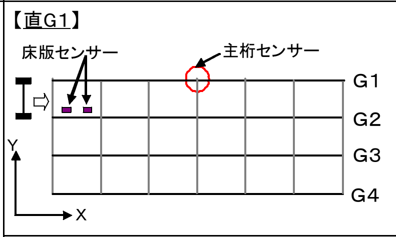
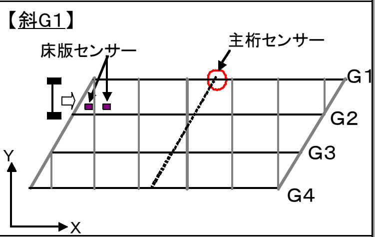
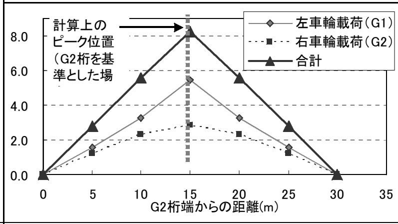
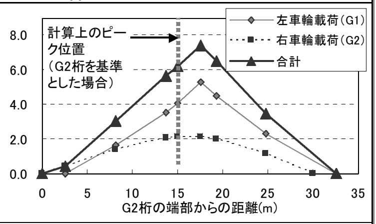
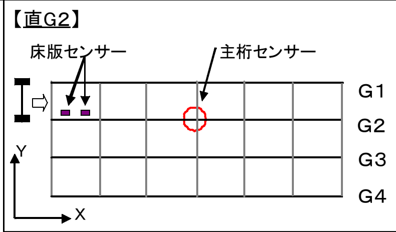
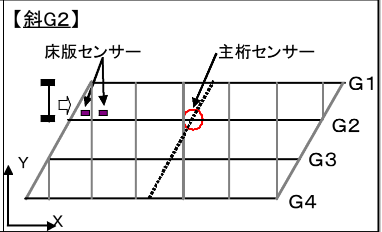
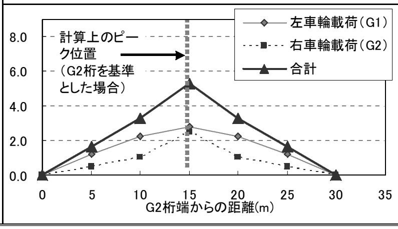
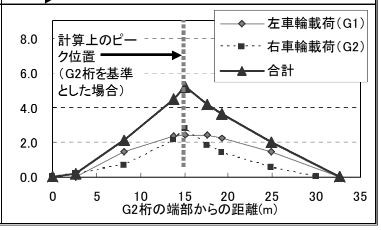
3.2.4　直橋・斜橋の違い

斜角を有する橋梁は、主桁位置に着目した場合と実際の車輪通過位置に着目した場合とで、橋梁部通過のタイミングが異なっている。そのため、計算上、桁を一本の棒として扱う当システムでは、理論上の主桁のひずみ応答と実際の応答との間に差が生じ、算定精度に影響を及ぼすことが懸念される。

表-3.2.4 は、斜角の有無と主桁支間中央部におけるひずみとの関係を格子モデルを用いて算定したものである。斜角がない場合は、常に輪荷重が支間中央部にきたときにひずみ応答のピークを生じているのに対し、斜角を有する場合は、ひずみ応答のピークを生じる位置が変化している様子がわかる。図-3.2.14 は、斜橋（蓮沼橋）における主桁のひずみ応答の例である。計算値と実測値は進入時のタイミング差により、初期の波形の勾配に若干の差が生じている。

図-3.2.15 に総重量の算定結果、図-3.2.16 に軸重の算定結果を示す。これらによると60°程度の斜角を有する場合でも、実用上問題のない精度で測定できており、斜角を有する橋梁でも十分に適用できる場合があることが示された。

表-3.2.4　主げたに設置するひずみゲージの斜角による影響

<table>
<tr><th>着目点</th><th>直橋</th><th>斜角45度</th></tr>
<tr><td rowspan="2">G1桁
支間中央</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td rowspan="2">G2桁
支間中央</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

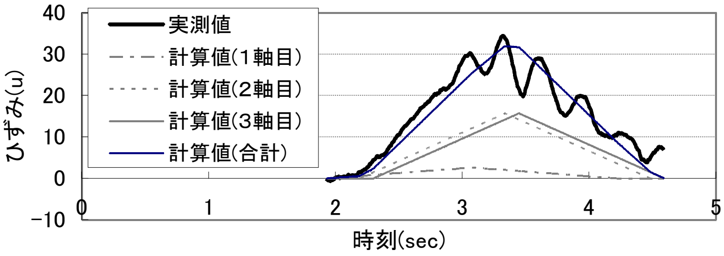
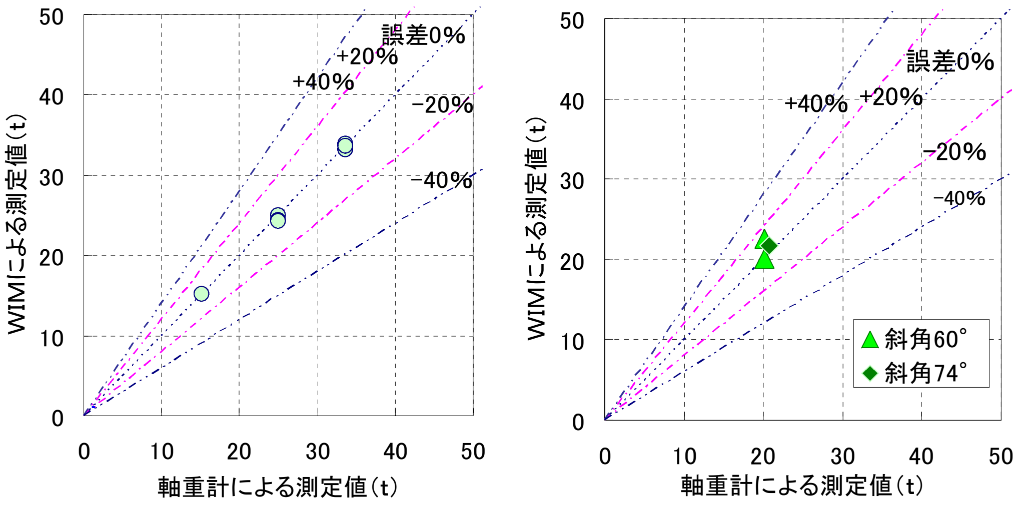


図-3.2.14　主桁のひずみ応答波形の例（斜橋）

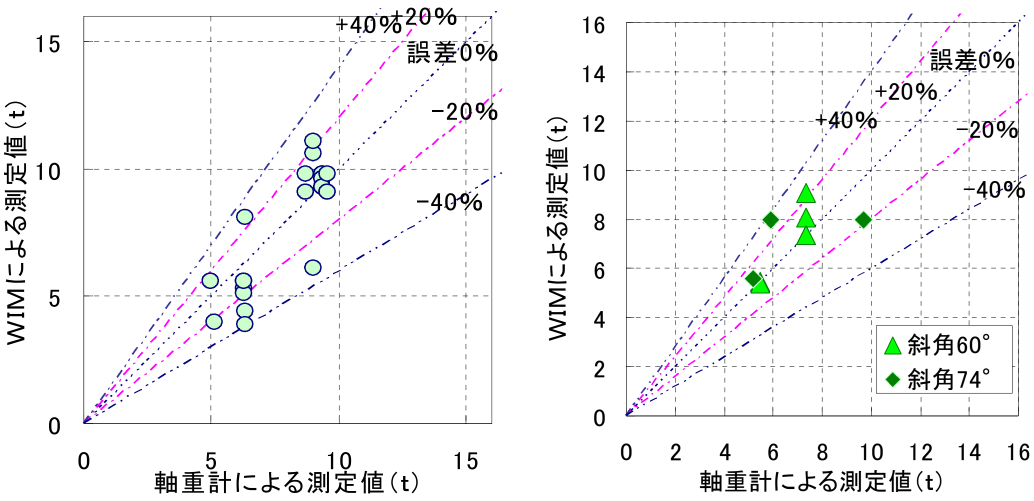
表-3.2.5　軸重算出結果の例（斜角の有無の影響）

調査橋梁	車両No.	測定方法	総　重　量（t）	精度(%)	軸　重（t）		
					P1	P2	P3
試験橋梁	T15a	BWIM	14.9	106	4.0	5.4	5.4
			14.5	103	7.0	3.8	3.8
			13.8	98	4.0	4.9	4.9
			13.7	97	3.8	4.9	4.9
			14.3	101	3.9	5.2	5.2
		軸重計	14.10	—	5.13	5.00	5.00
	T25	BWIM	21.2	100	5.5	7.9	7.9
			22.2	105	5.4	8.4	8.4
			22.2	105	5.2	8.5	8.5
			22.0	104	5.2	8.4	8.4
			21.3	101	5.2	8.1	8.1
		軸重計	25.01	—	6.29	9.36	9.36
蓮沼橋	T20c	BWIM	20.15	100	5.4	7.3	7.3
			22.6	112	5.4	9.0	9.0
		軸重計	20.15	—	5.45	7.35	7.35
住吉川橋	T20e	BWIM	21.7	105	5.6	8.0	8.0
		軸重計	20.71	—	5.15	9.68	5.88



(a)　直橋(試験橋梁)　　(b)　斜橋(蓮沼橋,住吉川橋)

図-3.2.15　総重量精度



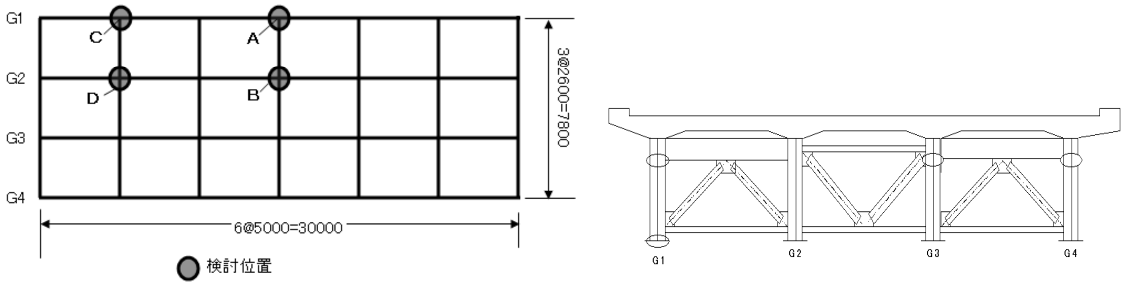
(a)　直橋(試験橋梁)　　　　(b)　斜橋(蓮沼橋,住吉川橋)

図-3.2.16　軸重精度

3.2.5　荷重分配効果の影響

当システムでは、主桁のひずみの影響線を一次式で近似しているが、横桁や対傾構などによる荷重分配効果により、厳密には主桁ひずみの影響線は一次式とはならず、誤差の原因となる可能性がある。

図-3.2.18 に、単純鋼 I 桁橋（橋長 30m，主げた本数４本，横桁（対傾構）数７本）を模擬した格子モデルを用いて、荷重分配効果や集中荷重の載荷位置の違いと影響線形状との関係を計算した結果を示したものである。格子モデルの概略および一覧をそれぞれ図−3.3.17、表−3.3.8 に示す。



(a)平面図　(b)断面図

図−3.2.17　格子モデルの概略

表−3.2.8　モデル一覧

モデル	端横桁（A1）	中間横桁	端横桁（A2）	その他
モデル 01	フルウェブ	フルウェブ	フルウェブ	対傾構
モデル 02	対傾構	対傾構	対傾構	対傾構
モデル 03	フルウェブ	フルウェブ	フルウェブ	フルウェブ
モデル 04	対傾構	フルウェブ	対傾構	対傾構
モデル 05	フルウェブ	対傾構	フルウェブ	対傾構

図-3.2.18 の結果から、G1 桁の支間中央部のひずみに着目した場合については、荷重分配効果による主桁ひずみの影響線形状に大きな違いは見られていない。一方、G2 桁や主桁端部付近のひずみに着目した場合は、載荷条件によって、影響線形状が大きく変化する場合があり、誤差の原因となる可能性がある。

主桁ひずみの測定箇所を選定する際には、こうした主桁ひずみの応答特性に十分配慮する必要がある。

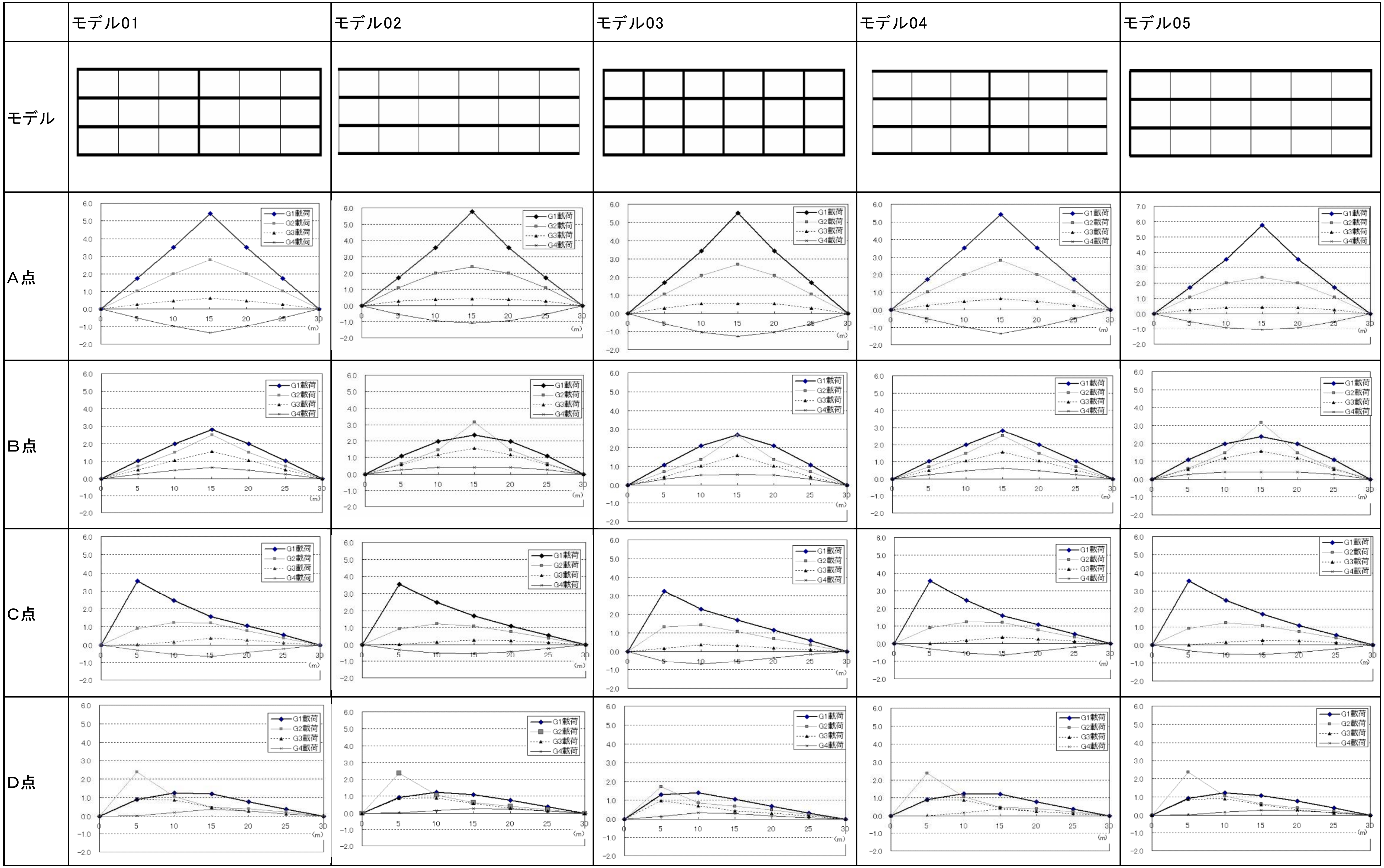


図-3.2.18　荷重分配効果の相違と影響線形状の関係

3.2.6　支間長の違い

当システムでは、橋梁上に同時載荷される車軸数が多くなると、主桁の応答値から各軸重を算定する際の未知数が増え、算定精度が低下する可能性がある。したがって、複数の車両が同時載荷される可能性が高まる支間長の長い橋梁に適用する場合には注意が必要である。

表-3.2.8 に、橋梁の支間長の違いによって、同時載荷される確率がどのように変化するのかを調査するため、大型車の連行走行や並列走行の発生率を示す。福岡橋と北陸橋を比較すると、計測台数、車線数、分析時間がほぼ同じであるにもかかわらず、支間長が長くと連行・並走率が高くなっている。また、岩屋高架橋、住吉川高架橋、芦屋川橋について比較しても同様のことがいえる。さらに、２車線の橋梁上に大型車混入率を考慮して車両を発生させ、連行・並走率を算出した結果を表-3.2.9 に示す。ここからも、支間長、大型車混入率が増加するほど、連行・並走率が大きくなるといえる。

以上のことから、本システムの適用にあたってはなるべく同時載荷されうる軸数が小さくなるよう、支間 30m 程度の単純桁橋を選定するのがよい。

表-3.2.8　連行並走率

橋梁名	福岡橋	北陸橋	岩屋高架橋	住吉川高架橋	芦屋川橋
支間長(m)	40.9	53.4	21.4	24.0	33.4
車線数	2車線	2車線	3車線	3車線	3車線
分析時間	6時間	6時間	12時間	12時間	12時間
計測台数	554	683	1103	2073	2065
単独走行台数	430	345	865	1321	867
連行対象台数	46	256	8	88	172
並走対象台数	78	82	230	664	1026
単独走行率(%)	78	51	78	64	42
連行対象率(%)	8	37	1	4	8
並走対象率(%)	14	12	21	32	50

表-3.2.9　連行並走率シミュレーション結果(くりかえし数 100 回の最大値)

連行並走率(%)	大型車混入率(%) ＼ 支間長(m)	30	40	50	60
連行率	20	6	6	6	6
	30	10	11	11	11
	40	16	16	17	17
並走率	20	5	6	6	5
	30	10	10	11	12
	40	15	15	17	16

3.3　車両の走行条件

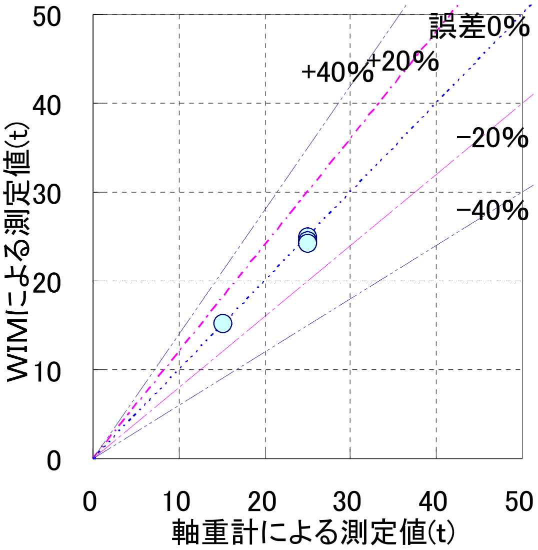
3.3.1　車両の軸数

橋梁上に同時載荷される車軸数が多くなると、主桁のひずみから各軸重を算定する過程で、未知数が多くなるため、精度の低下を生じる場合がある。ここでは、最大６軸を有する車両の単独走行時を対象として軸数と算定精度の関係を調査した。

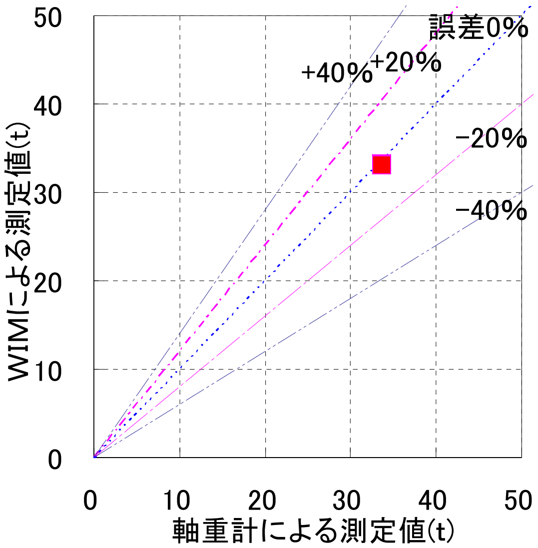
表-3.3.1、図-3.3.1，２に３軸車から６軸車までの車両の軸重算出結果を示す。車両軸重の相違が総重量の算出精度に及ぼす影響は少ないものの、軸数が多い車両で軸重算出結果がばらついており、精度の低下がみられる。

表-3.3.1　車軸数と軸重算出精度の検証結果の例

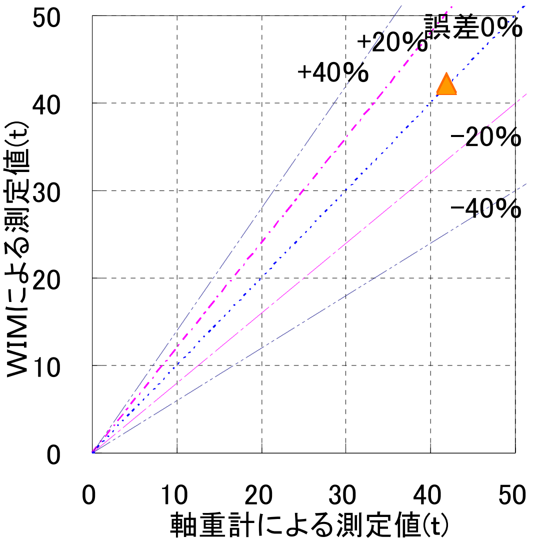
車両NO	軸数	計測方法	総重量(t)	精度(%)	P1(t)	P2(t)	P3(t)	P4(t)	P5(t)	P6(t)
T25	3	BWIM	24.2	97	5.6	9.3	9.3			
		軸重計	25.01	–	6.29	9.36	9.36			
Tr35a	4	BWIM	33.2	99	4.4	10.6	9.1	9.1		
			33.1	98	3.9	11.1	9.1	9.1		
		軸重計	33.62	–	6.35	9.03	9.55	8.70		
Tr42a	5	BWIM	42.4	101	5.1	12.9	8.1	8.1	8.1	
			42.1	101	4.1	14.7	7.8	7.8	7.8	
		軸重計	41.81	–	6.80	11.30	8.54	8.10	7.03	
Tr42b	5	BWIM	40.3	96	4.0	13.1	7.7	7.7	7.7	
			41.4	98	7.2	8.3	8.6	8.6	8.6	
		軸重計	42.05	–	6.70	11.50	6.09	7.75	10.00	
Tr45	6	BWIM	45.5	103	5.1	6.6	6.6	9.1	9.1	9.1
			45.3	102	4.5	6.9	6.9	9.0	9.0	9.0
		軸重計	44.22	–	5.51	7.10	7.26	6.34	8.67	9.35



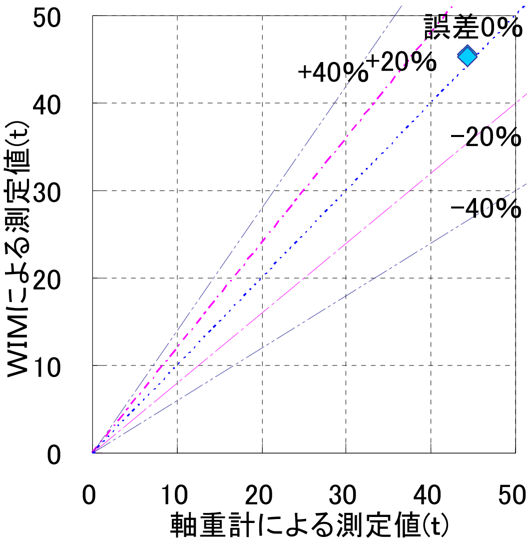
(a) 3 軸車



(b) 4 軸車

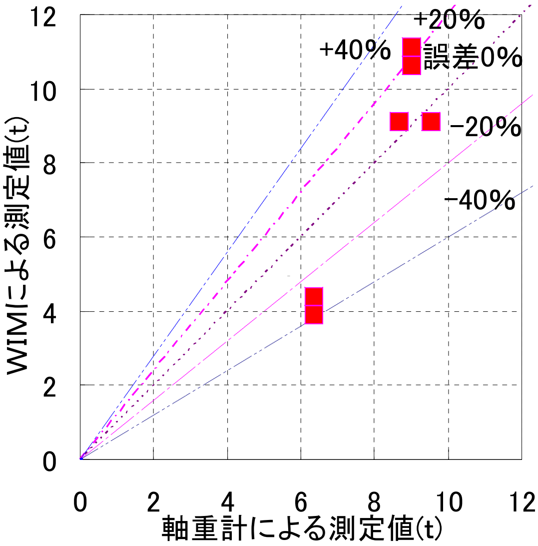


(c) 5 軸車

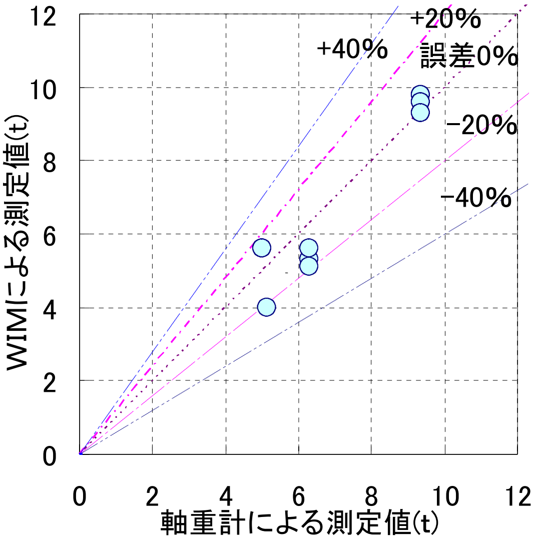


(d) 6 軸車

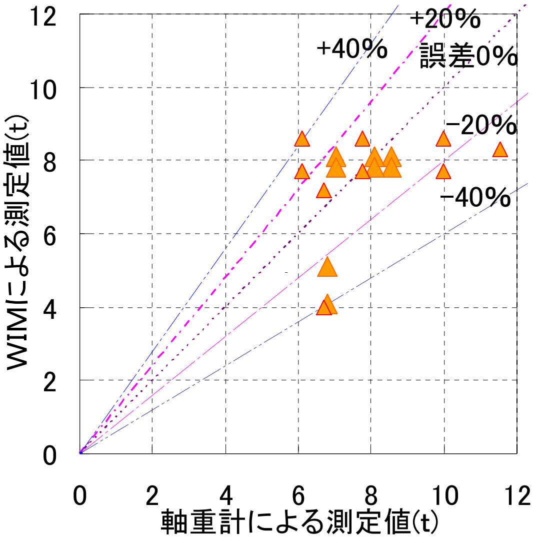
図-3.3.1　総重量精度



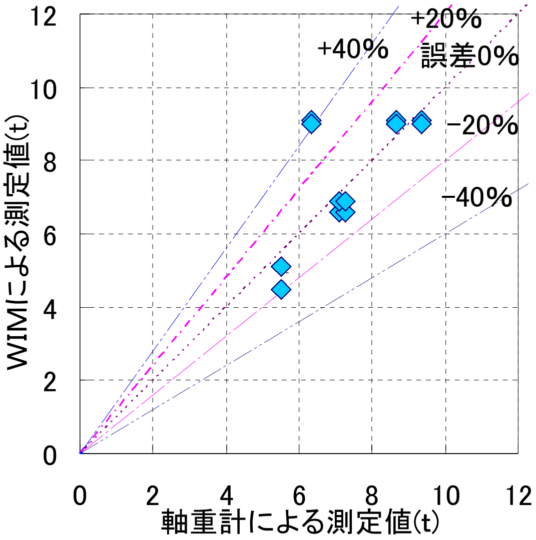
(a) 3 軸車



(b) 4 軸車



(c) 5 軸車



(d) 6 軸車

図-3.3.2　軸重精度

3.3.2 連行・並走条件

橋梁上を複数の車両が走行する場合、主桁のひずみ応答値から各軸重を算定する課程で未知数が多くなる。また、複数の車軸が近接して通過した場合、他車両の影響が主桁のひずみ応答に現れ、精度低下が生じる場合がある。実交通においては、複数の車両が同時載荷される場合もあるため、２台の試験車両を単独走行、連行走行、並走走行、連行並走の４パターンで走行させ、精度の検証を行った。

図-3.3.3 に各種走行条件におけるひずみ応答波形の例、表-3.3.2 から表-3.3.3 および図-3.3.5 から図-3.3.8 に車両重量の算定結果を示す。これらの結果より、連行並走走行時に精度が悪くなるケースが見られる。

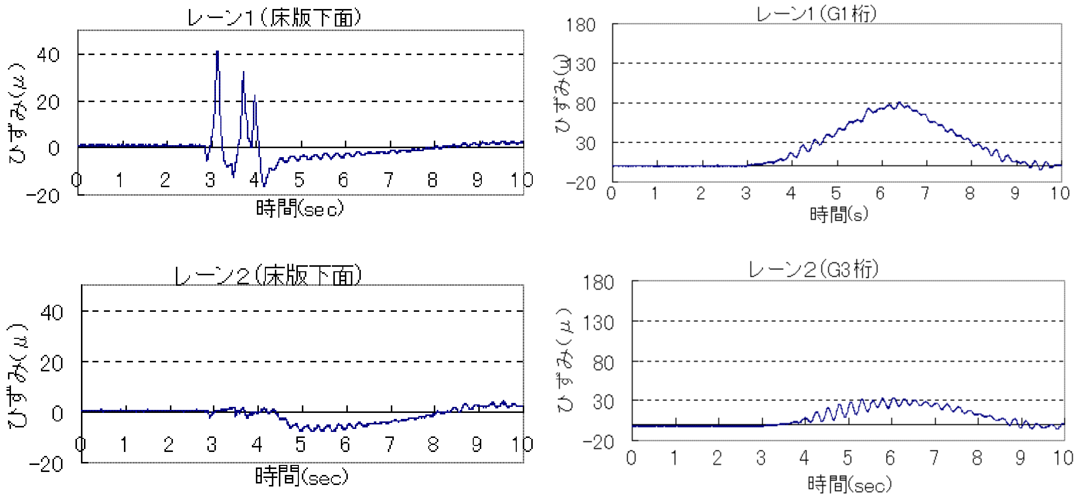


図-3.3.3(1)　単独走行（車両 No.T15a 試験橋梁走行時）

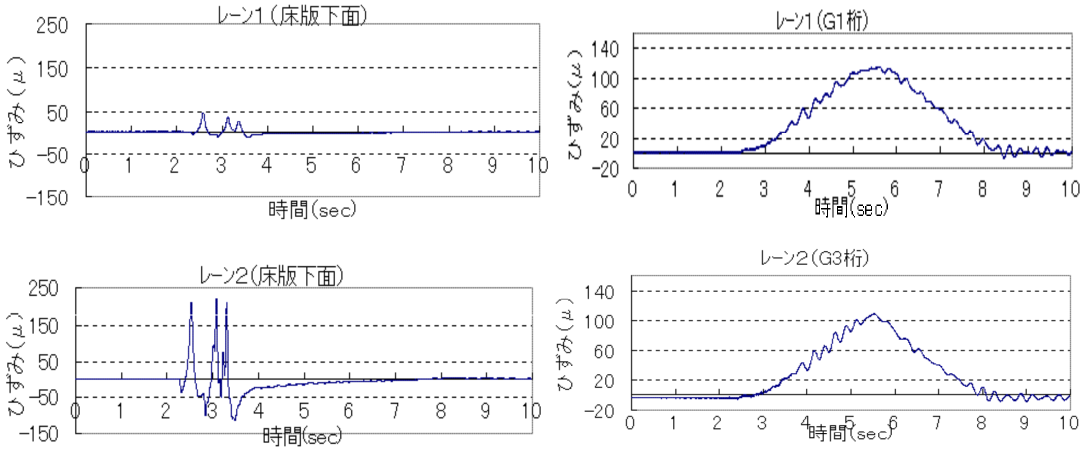


図-3.3.3(2)　並行走行（車両 No.T15a,T25 試験橋梁走行時）

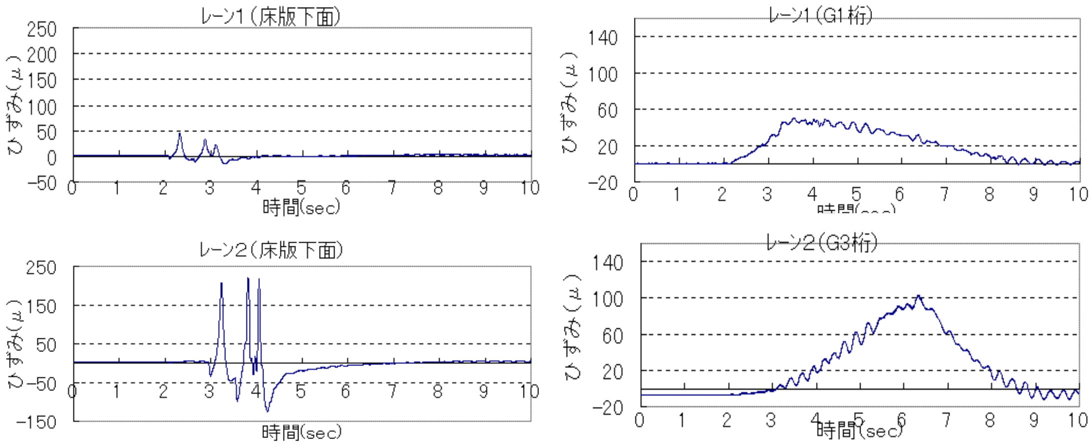


図-3.3.3(3)　連行並走（車両 No.T15a,T25 試験橋梁走行時）

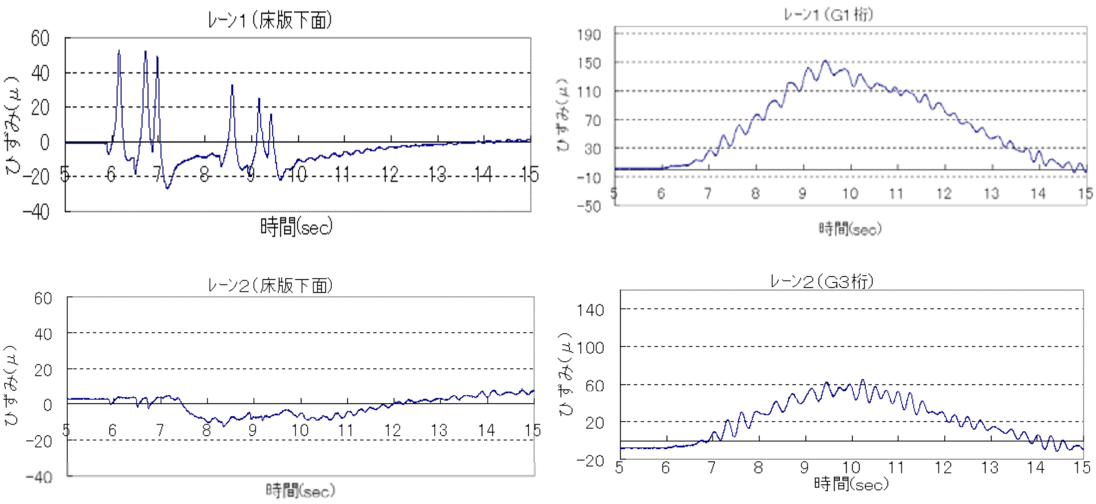


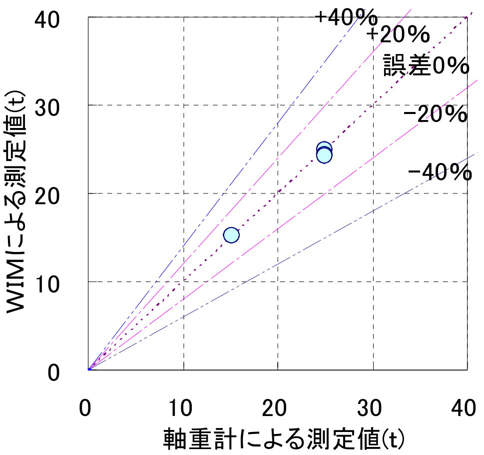
図-3.3.3(4)　連行走行（車両 No.T15a,T25 試験橋梁走行時）

表-3.3.2　重量算出結果一覧（試験橋梁）

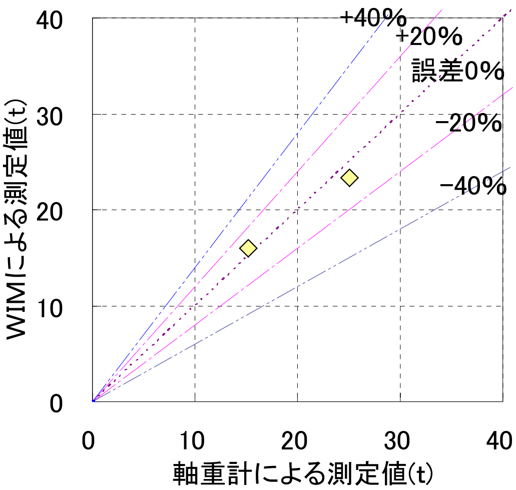
車両No	計測方法	走行条件	総重量(t)	精度(%)	軸重(t)		
					P1	P2	P3
T15a	BWIM	単独走行	15.2	100.5	4.0	5.6	5.6
		完全並走	16.1	106.2	4.2	5.9	5.9
		50%並走	15.5	102.5	4.3	5.6	5.6
		連行並走	10	65.9	0.5	4.7	4.7
		連行走行	16.6	109.8	4.5	6.1	6.1
	軸重計	–	15.13	–	5.13	5.0	5.0
T25	BWIM	単独走行	24.9	99.6	5.3	9.8	9.8
		完全並走	23.3	92.8	4.3	9.5	9.5
		50%並走	23.5	93.7	5.5	9.0	9.0
		連行並走	26.5	105.4	4.8	10.8	10.8
		連行走行	24.7	98.2	5.6	9.5	9.5
	軸重計	–	25.01	–	6.29	9.36	9.36

表-3.3.3　重量算出結果一覧（福岡橋）

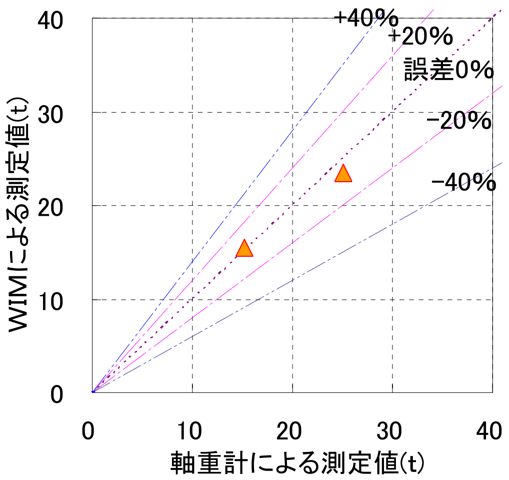
車両No.	計測方法	走行条件	計測No.	総重量(t)	精度(%)	軸重(t)		
						P1	P2	P3
T15b	BWIM	完全並走	1	16.7	118	3.8	6.4	6.4
			2	15.1	107	3.3	5.9	5.9
			3	15.3	109	3.4	5.9	5.9
		連行並走	1	35.8	254	9.2	13.3	13.3
			2	27.3	194	9.5	8.9	8.9
		連行走行	1	11.5	82	3.0	4.2	4.2
			2	12.8	91	3.2	4.8	4.8
			3	9.1	65	2.7	3.2	3.2
	軸重計			14.1	—	5.14	4.48	4.48
T20f	BWIM	完全並走	1	20	95	5.2	7.4	7.4
			2	22.8	108	5.9	8.4	8.4
			3	22.8	108	5.9	8.5	8.5
		連行並走	1	1.1	5	3.3	1.4	–
			2	6.8	32	7.6	-0.8	–
		連行走行	1	26.2	124	6.9	9.7	9.7
			2	22.6	107	5.9	8.4	8.4
			3	23.5	111	5.6	9.0	9.0
	軸重計			21.15	—	5.27	7.94	7.94



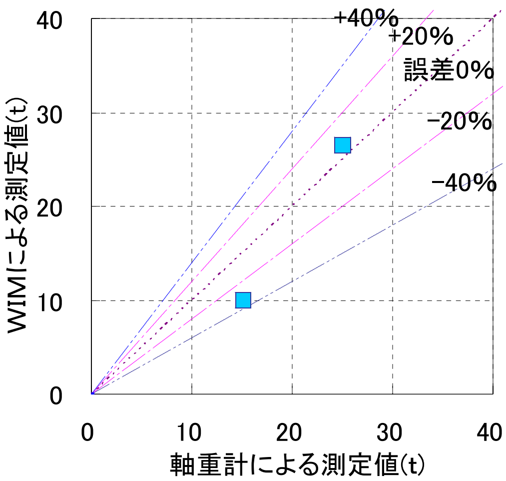
(a)　単独走行(車両 No.T15a,T25)



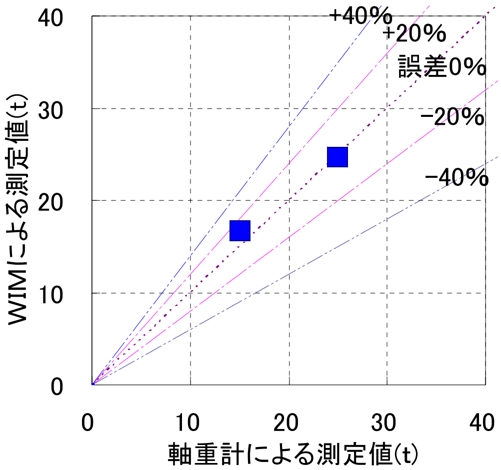
(b)　完全並走(車両 No.T15a,T25)



(c)　50 %並走(車両 No.T15a,T25)

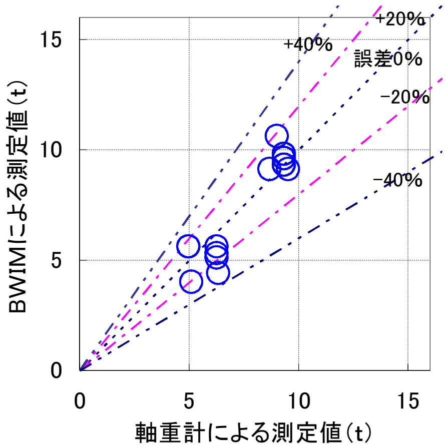


(d)　連行並走(車両 No.T15a,T25)

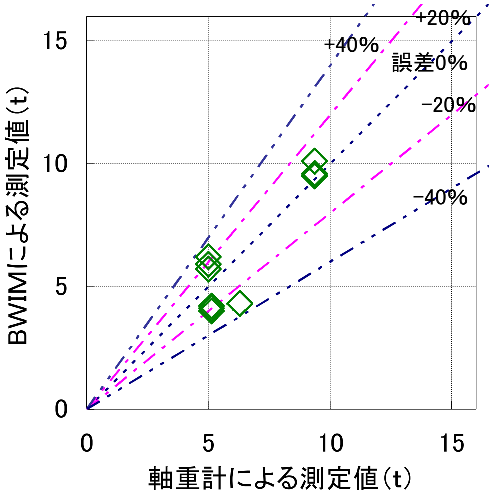


(e)　連行走行(車両 No.T15a,T25)

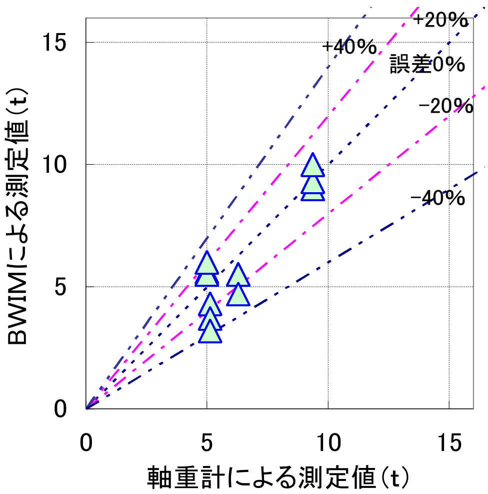
図-3.3.5　連行・並走条件　総重量精度（試験橋梁）



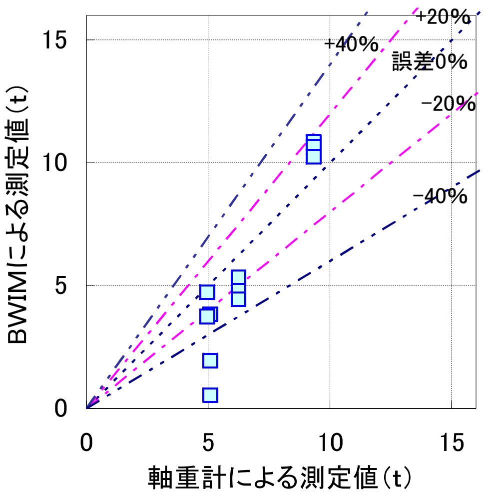
(a)　単独走行(車両 No.T15a,T25)



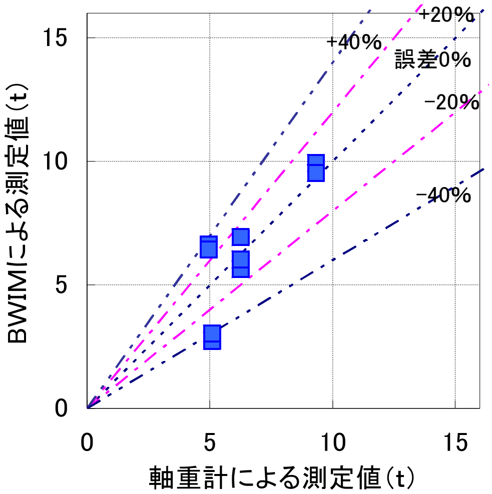
(b)　完全並走(車両 No.T15a,T25)



(c)　50 %並走(車両 No.T15a,T25)

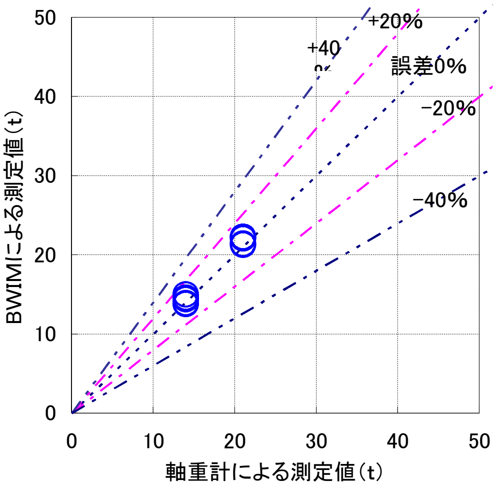


(d)　連行並走(車両 No.T15a,T25)

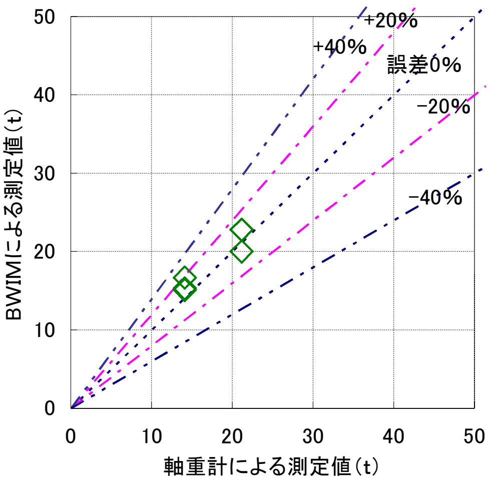


(e)　連行走行(車両 No.T15a,T25)

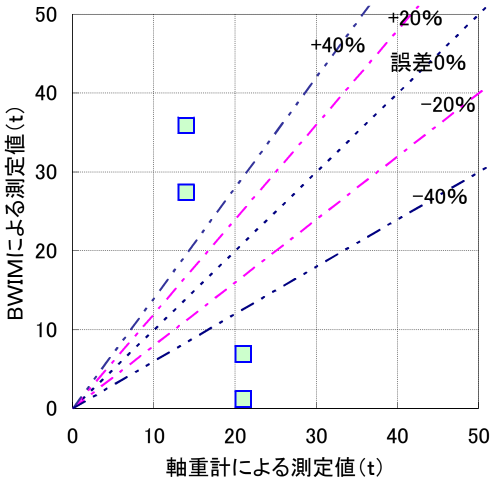
図-3.3.6　連行・並走条件　軸重精度（試験橋梁）



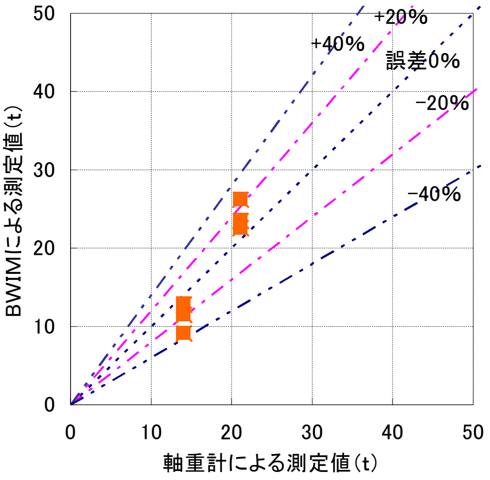
(a)　単独走行(車両 No.T15b,T20f)



(b)　完全並走(車両 No.T15b,T20f)

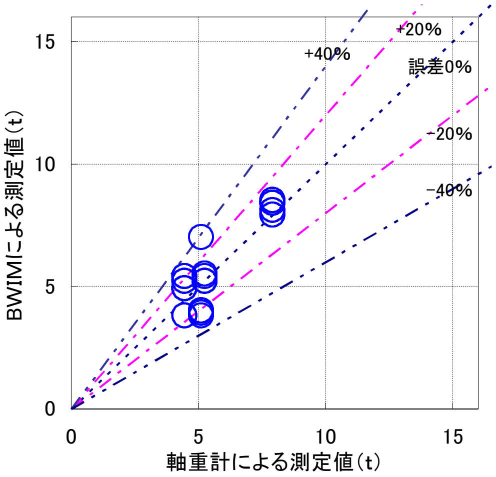


(c)　連行並走(車両 No.T15b,T20f)

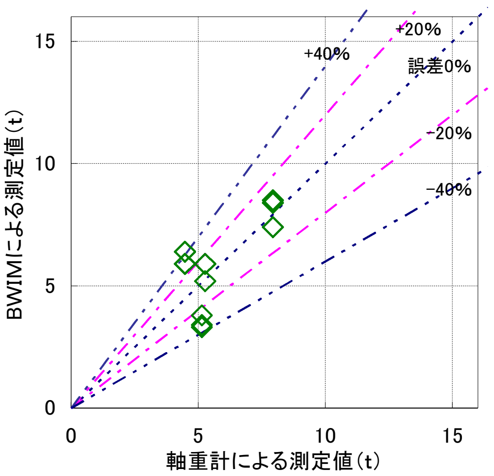


(d)　連行走行(車両 No.T15b,T20f)

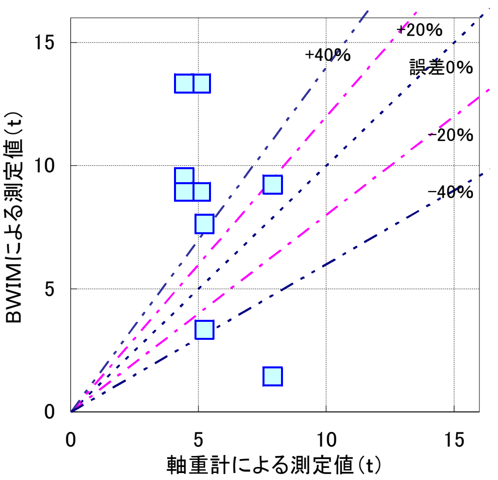
図-3.3.7　連行・並走条件　総重量精度（福岡橋）



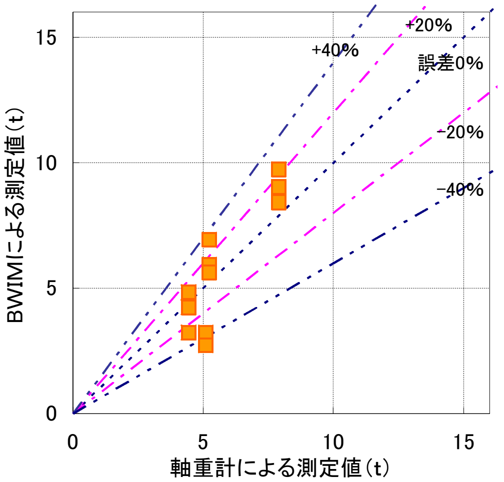
(a)　単独走行(車両 No.T15b,T20f)



(b)　完全並走(車両 No.T15b,T20f)



(c)　連行並走(車両 No.T15b,T20f)



(d)　連行走行(車両 No.T15b,T20f)

図-3.3.8　連行・並走条件　軸重精度（福岡橋）

3.3.3　走行速度の条件

（１）　走行速度

図-3.3.9 に、図-2.3.5 に示した３軸トラックおよび５軸トレーラがそれぞれ低速，40，80km/h で走行したときの応答波形の例を示す。また、表-3.3.4 および図-3.3.11 に車両重量の測定結果を示す。

これらの結果から、車両振動特性の違いを反映し、主桁をはじめとする応答時間の中井部材の応答波形は、走行速度によって異なっていることがわかる。しかしながら、車両重量の算定結果に顕著な影響は表れていない。このことから、主桁のような応答時間の長い部材の実測波形の計算波形の誤差を最小化する当システムにおいては、走行速度の変化による部材応答特性の変化に対する重量算定の感度は小さいと言える。

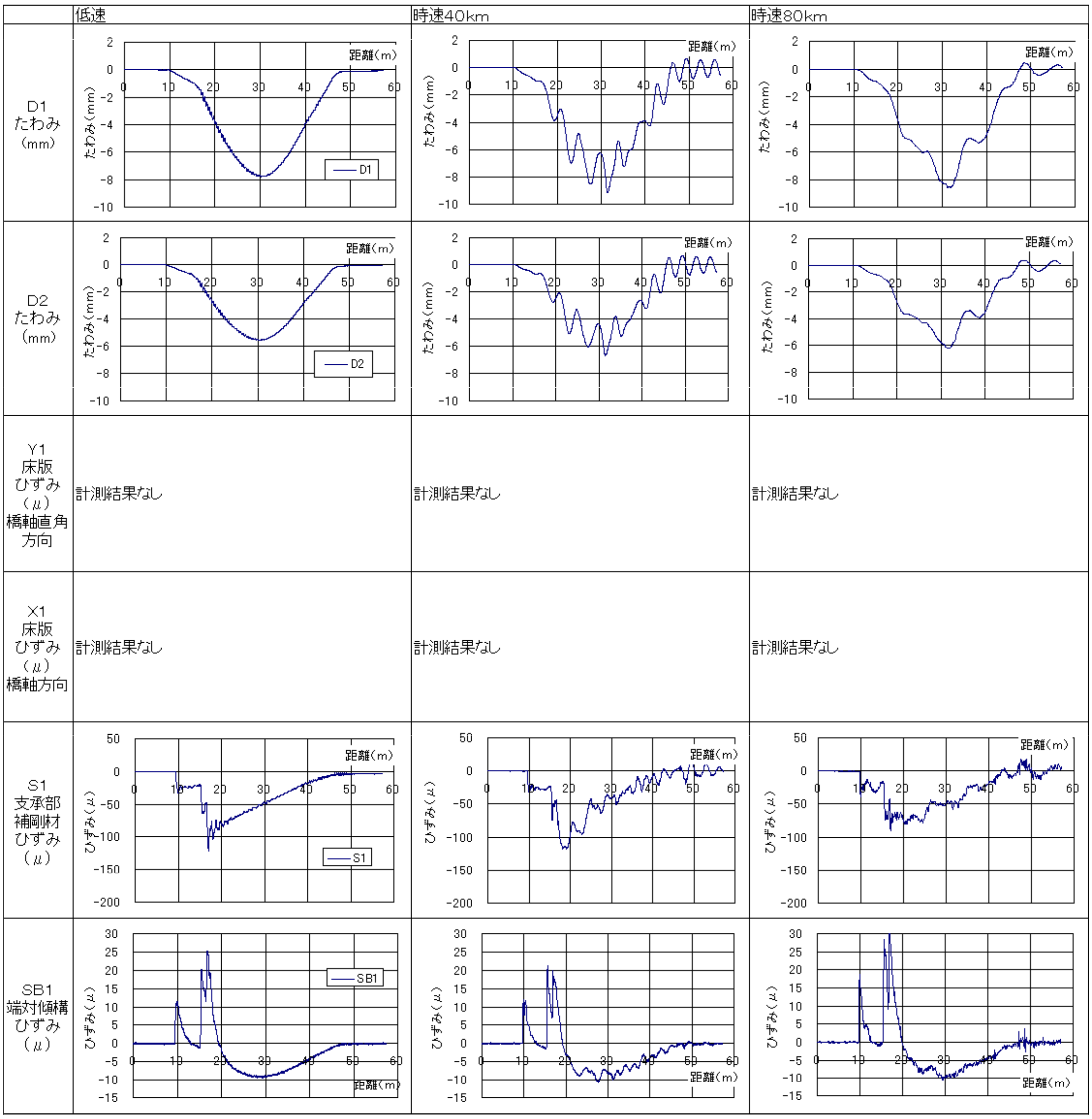


図-3.3.9　試験橋梁各部の応答（３軸トラック）

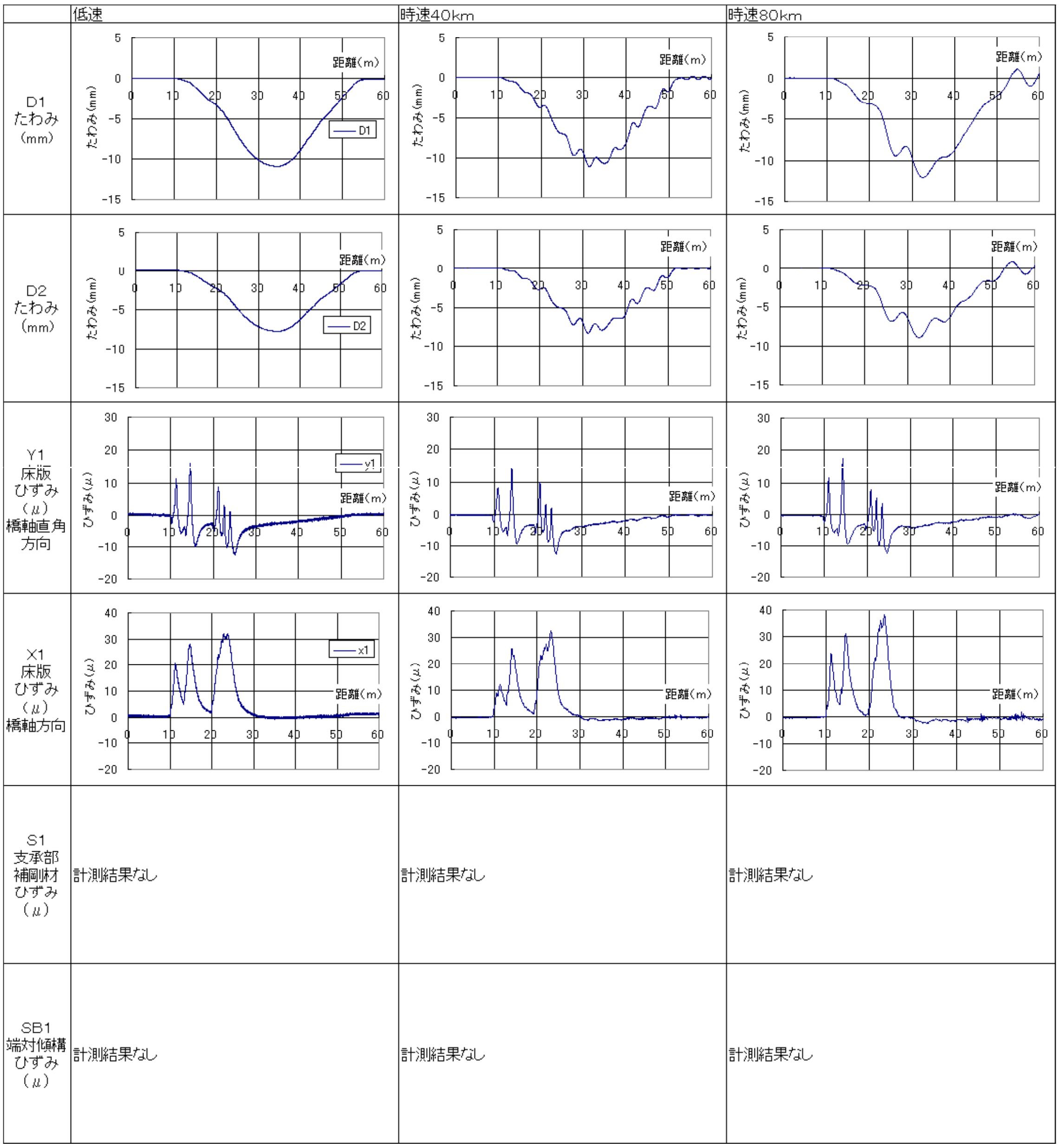
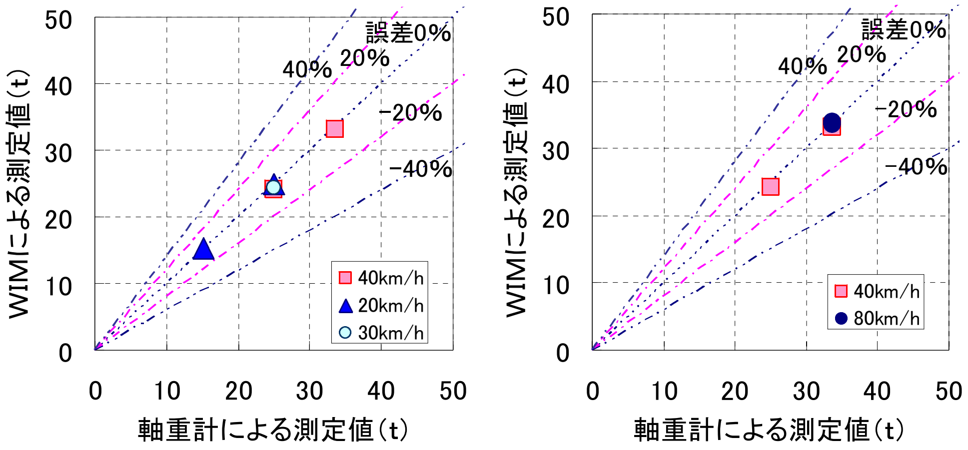


図-3.3.10　試験橋梁各部の応答（５軸トレーラ）

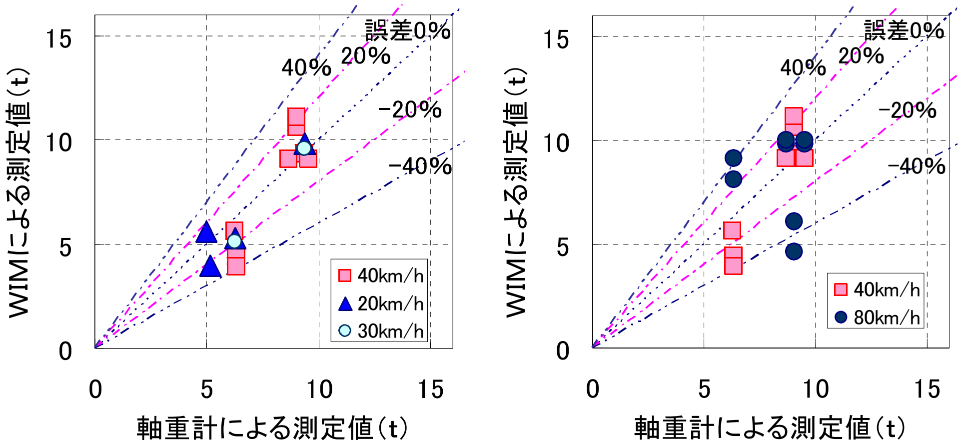
表-3.3.4　重量算出結果一覧(case4-2-1 ～ 6)

車両No	計測方法	総重量	精度	P1	P2	P3	P4	P5	P6	速度
T25	BWIM	24.9	100	5.3	9.8	9.8				19.1
		24.4	98	5.1	9.6	9.6				30.0
		24.2	97	5.6	9.3	9.3				40.7
	軸重計	25.01	–	6.29	9.36	9.36				–
Tr35	BWIM	33.2	99	4.4	10.6	9.1	9.1			43.0
		33.1	98	3.9	11.1	9.1	9.1			45.0
		33.9	101	8.1	6.1	9.8	9.8			80.9
		33.6	100	9.1	4.6	10.0	10.0			78.3
	軸重計	33.62	–	6.35	9.03	9.55	9.55			–



(a)車両 No.T25　　(b)車両 No.Tr35

図-3.4.11　速度に対する総重量精度



(a)車両 No.T25　　(b)車両 No.Tr35

図-3.3.12　速度に対する軸重精度

（２） 走行速度の変化

車両が橋梁上を等速走行すると仮定している当システムにおいては、橋梁上で車両が速度変化を生じると、主桁ひずみの応答形状が、計算値に対してずれ、誤差の原因となる。

今回の一連の計測の中では、北陸橋が信号の近くに位置し、車両が方向により加速もしくは減速しながら走行する例が見られた。図-3.3.13 に北陸橋の主桁のひずみ応答の例を示す。これによると、図-3.3.14(a)のように橋梁通過中に速度変化を生じたことが原因と見られるひずみ応答の計算値に対するずれが生じていることがわかる。その場合、表-3.3.4、図-3.3.15 に示すように、速度を等速であると補正したケースに対し、軸重の精度が著しく低下している。

したがって、当システムにより精度良く重量を算出するためには、計測に用いる橋梁を選定する際、橋梁上での速度変化が極力起こらないような橋梁を選定することが必要である。

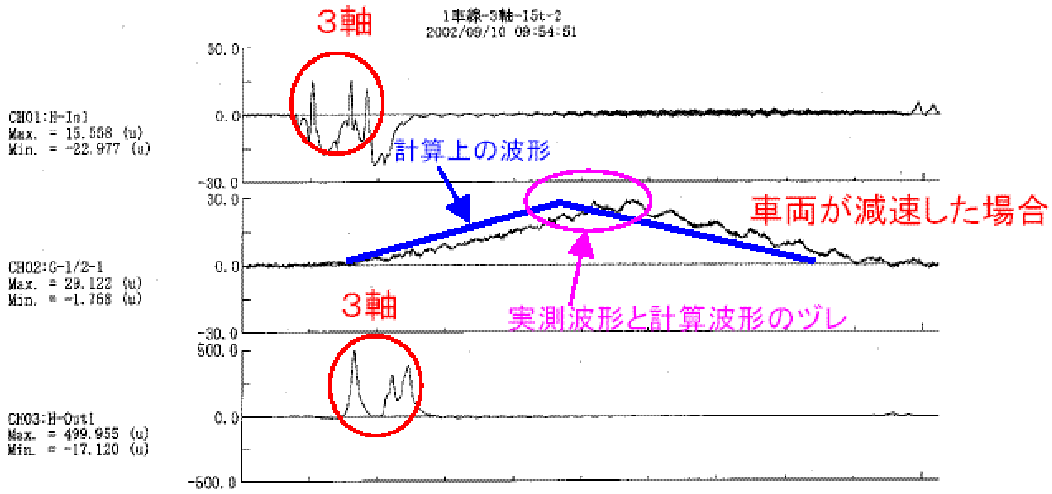
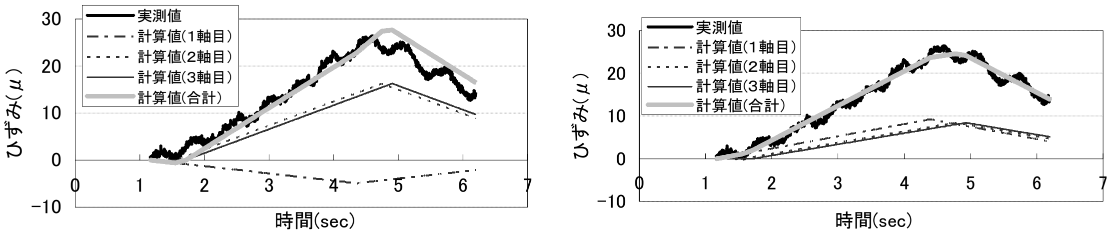


図-3.3.13 途中で速度変化したときの波形



(a)橋梁通過中に速度変化した波形の例　　(b)橋梁を等速度で通過した波形の例

図-3.3.14 重量算出の計算

表-3.3.4 算出結果の例

計測方法	総重量(t)	精度(%)	P1(t)	P2(t)	P3(t)
BWIM	13.1	92.7	15.63	-1.28	-1.28
軸重計	14.1	-	5.14	4.48	4.48

3.3.4 車両振動による影響

主桁のように車両の通過に対する応答時間が長い部材では、車体振動の影響が部材応答に顕著に現れることがある。ここでは、車両振動に伴う主桁のひずみ波形の乱れが、当システムを用いた車両重量の算出精度に与える影響について確認する。

図-3.3.16 に試験橋梁における無載荷時（車両が通過していない状態）のひずみ応答波形、図-3.3.17 にその波形の周波数分析結果を示す。これらより、試験橋梁では、車両の通過に対する外乱の作用により、固有振動数が 2Hz を超える成分が卓越した振動を生じやすいことがわかる。

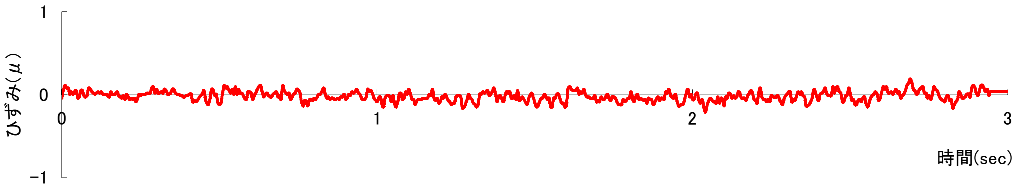


図-3.3.16　無載荷時のひずみ応答波形

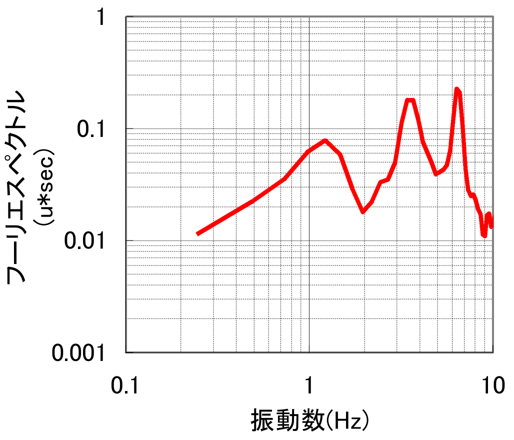
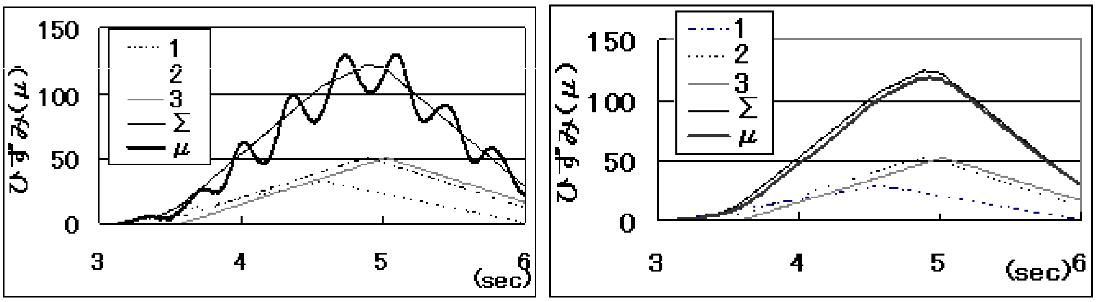


図-3.3.17　フーリエスペクトル処理結果

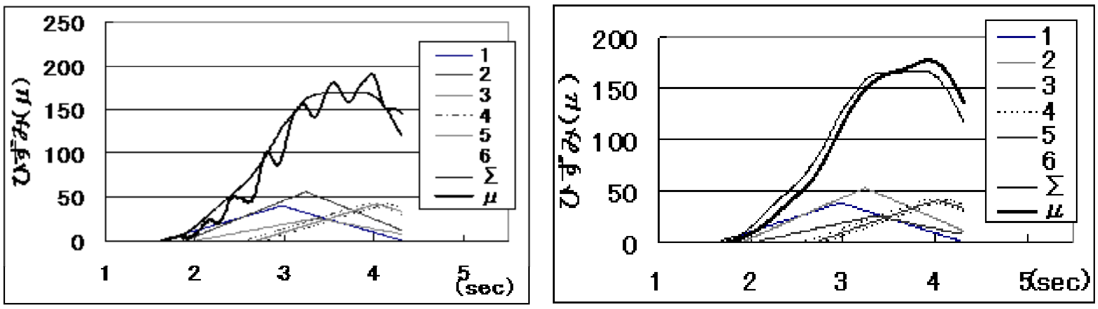
図-3.3.18 に、主桁の振動の影響を取り除くため、ローパスフィルタ処理により 2Hz 以上の高周波成分を除去した波形（以下、「処理波形」という）を示す。次に、実測波形と処理波形それぞれを用いて、車両の総重量と軸重を計算した結果を表-3.3.3 に示す。これによると、車両振動の影響の有無によって、車両の軸重や総重量の算定結果に顕著な相違が生じていないことがわかる。

このことから、主桁のような応答時間の長い部材の実測波形の計算波形の誤差を最小化する当システムにおいては、走行速度の変化による部材応答特性の変化に対する重量算定の感度は小さいと言える。



(a)フィルターなし　　　　　　　　　(b)フィルターあり

図-3.3.18(1)　計算ひずみと実測ひずみの比較（試験橋梁 L/2 点・３軸車）



(a)フィルターなし　　　　　　　　　(b)フィルターあり

図-3.3.18(2)　計算ひずみと実測ひずみの比較（試験橋梁 L/2 点・６軸車）

表-3.3.3　重量算出結果

車両NO	軸数	計測方法	総重量(t)	精度(%)	P1(t)	P2(t)	P3(t)	P4(t)	P5(t)	P6(t)
T25	3	BWIMフィルターなし	25.53	102	6.1	9.71	9.71			
		BWIMフィルターあり	25.84	103	5.57	10.14	10.14			
		実軸重	25.01	−	6.29	9.36	9.36			
Tr45	6	BWIMフィルターなし	47.03	106	7.53	10.69	4.85	7.99	7.99	7.99
		BWIMフィルターあり	46.09	104	7.31	10.17	4.92	7.9	7.9	7.9
		実軸重	44.23	−	5.51	7.10	7.26	6.34	8.67	9.35

3.3.5　車両走行位置

車軸の検知に適した部材は、荷重に対する応答範囲が狭く、車輪の通過位置がばらつくことにより、設置したひずみゲージが適切に応答せず、適切に測定できない可能性があることが懸念される。ここでは、車輪の通過位置を橋軸直角方向に 500mm ずらした場合の重量算定の可否について調査した。

図-3.3.18 に、床版下面に設置したひずみゲージの直上を車輪が通過した場合、図-3.3.19 には、床版下面のひずみゲージに対し、車輪の通過位置を 500mm ずらした場合の床版下面の橋軸方向のひずみを示す。これらの結果によると、車輪の走行位置に関係なく、入口側，出口側ともに４つの車軸のピークが分離されており、500mm 程度の走行位置のずれによる重量算出精度への影響も顕著でないといえる。

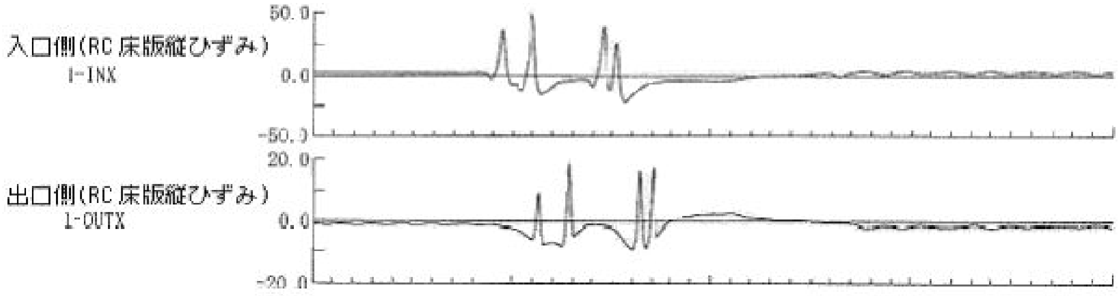


図-3.3.18　走行位置をずらしたケース

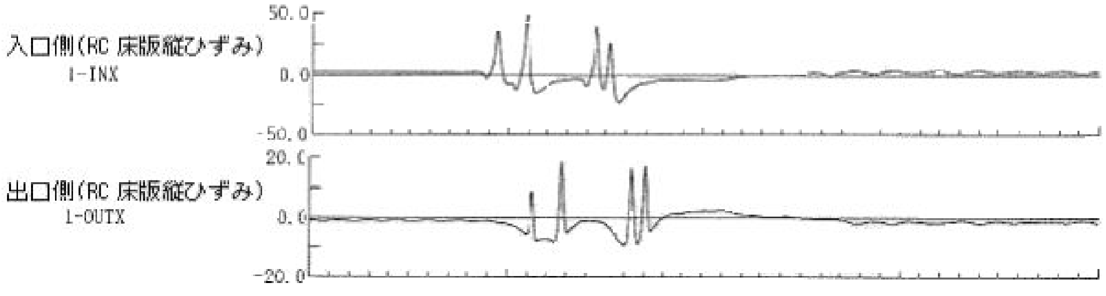


図-3.3.19　想定した位置を走行したケース

表-3.5.1　重量算出結果一覧

車両No	算定方法	走行位置のズレ(mm)	総重量(t)	精　度(%)	軸重(t)					
					P1	P2	P3	P4	P5	P6
Tr35a	BWIM	500	33.9	101	8.1	6.1	9.8	9.8		
		0	33.6	100	9.1	4.6	10.0	10.0		
	軸重計	－	33.62	－	6.35	9.03	9.55	8.70		
Tr45	BWIM	0	46.1	104	11.5	2.8	2.8	9.6	9.6	9.6
		500	45.5	103	11.8	2.4	2.4	9.6	9.6	9.6
		0	45.4	103	9.1	4.0	4.0	9.5	9.5	9.5
	軸重計	－	44.22	－	5.51	7.10	7.26	6.34	8.67	9.35

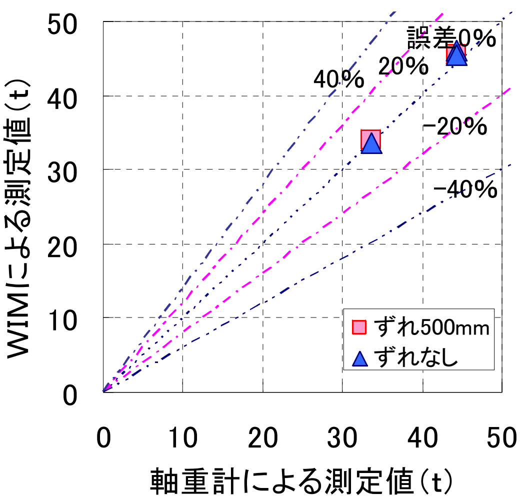


図-3.5.6(1)　総重量精度

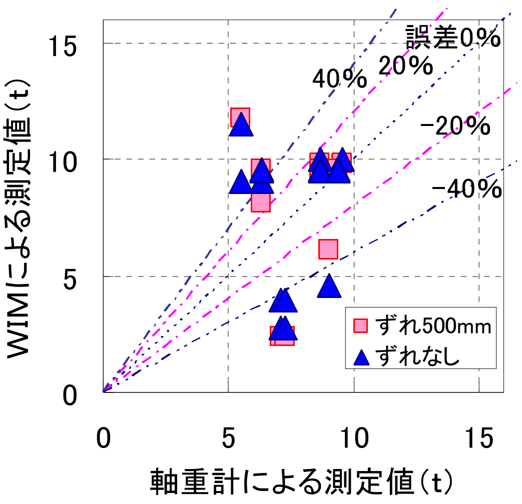


図-3.5.6(2)　軸重精度

3.4　計測の条件

3.4.1 主桁の計測位置

車両重量を算出する際、主桁のひずみは、最も大きな応答が得られる支間中央にて測定することが望ましい。しかしながら、橋梁によっては、桁下の状況から、主桁の支間中央部にひずみゲージを設置することができない場合もある。ここでは、主桁の支間中央部でひずみ測定ができない場合の適用性を確認するため、支間長をＬとして、桁端部からの距離がＬ/2, Ｌ/4, Ｌ/8 の各点でひずみ測定を行った場合の算定精度について調査した。

図-3.4.1 に、主桁下フランジのひずみゲージ設置状況、図-3.4.2 に、車両 T25 が試験橋梁上を走行したときの、主桁下フランジ各点におけるひずみの計算値および実測値、表-3.4.1，図-3.4.2，図-3.4.3 に、主桁下フランジ各点のひずみを用いて、車両重量を算定した結果を示す。これらの結果から、L/8 点や L/4 点においても、L/2 地点と同等の精度で重量の算出が十分可能な場合があることがわかった。

図-3.4.1　主桁下フランジのひずみゲージ設置状況

表-3.4.1　計算値と実測波形

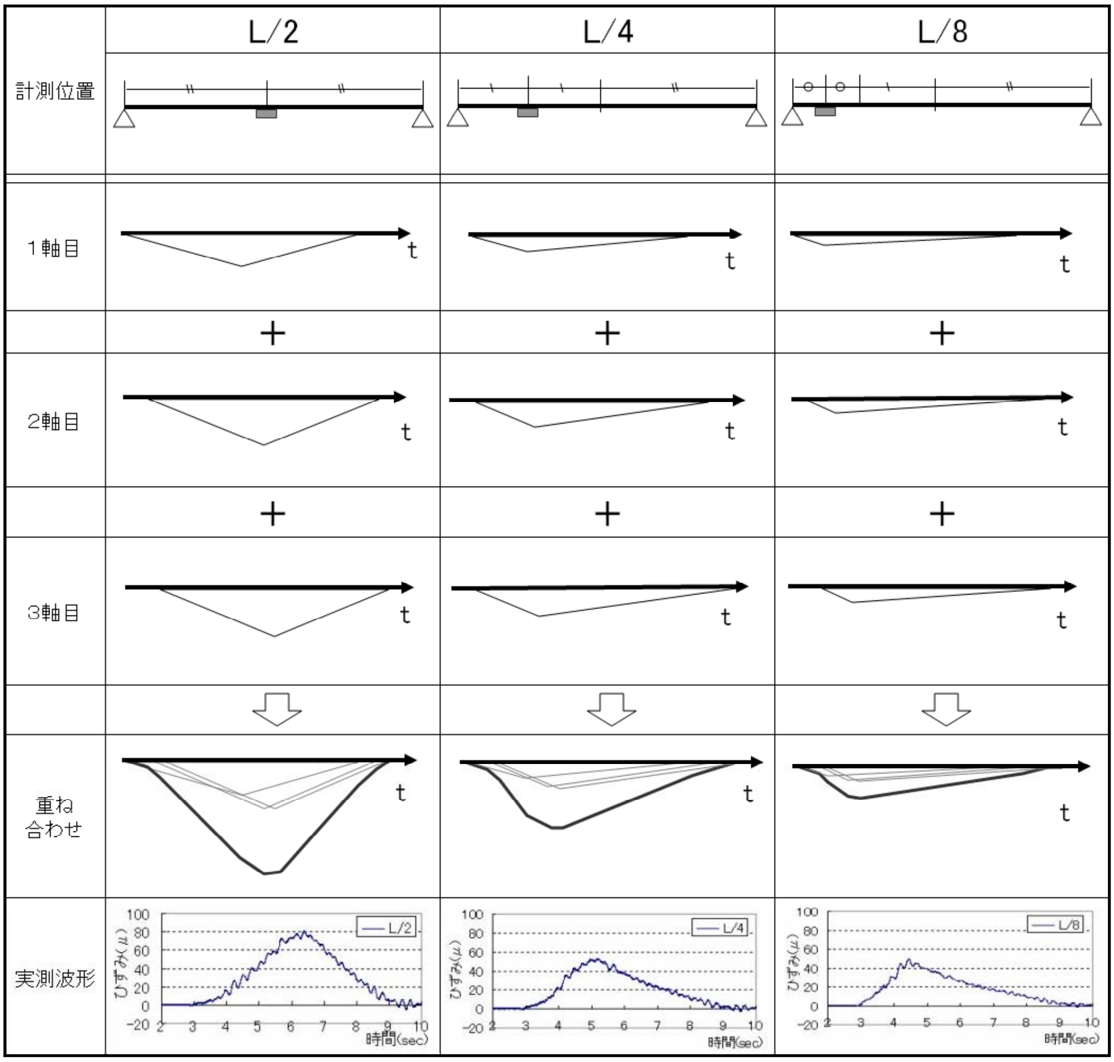


表-3.4.2　主桁の計測位置結果一覧

計測位置	計測方法	総重量 (t)	精度 (%)	P1 (t)	P2 (t)	P3 (t)
L/2	BWIM	15.2	100.5	4.0	5.6	5.6
L/4		15.2	100.5	5.4	4.9	4.9
L/8		15.0	99.1	5.4	4.8	4.8
	軸重計	15.13	－	5.13	5.00	5.00
L/2	BWIM	24.9	99.6	5.3	9.8	9.8
L/4		24.6	98.4	5.9	9.3	9.3
L/8		24.6	98.4	5.7	9.4	9.4
	軸重計	25.01	－	6.29	9.36	9.36

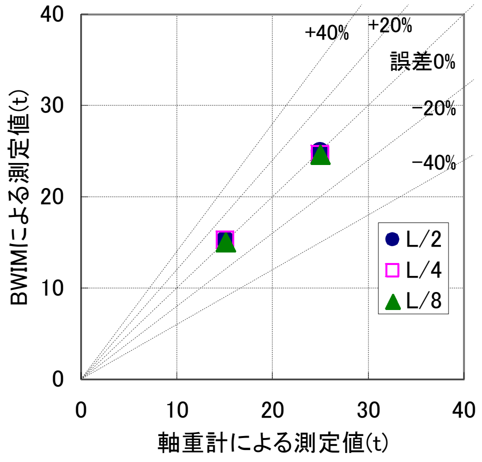


図-3.4.2 総重量精度

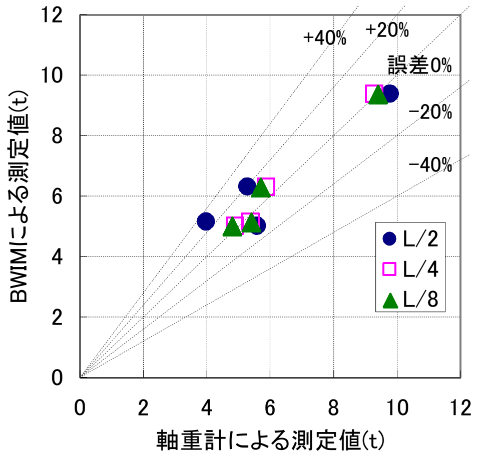


図-3.4.3　軸重精度

3.4.2　床版の計測位置

床版のひずみ測定にあたっては、各車軸の影響が明瞭に分離された応答波形を得ることが条件となるが、自動車荷重による影響範囲が狭いだけでなく、ひび割れの存在など部材の状態によっても、応答性状が敏感に変化するので、コンクリート床版であっても適用が限定される場合がある。

１）ひずみの影響範囲

床版のひずみは荷重に対する影響範囲が狭いため、車両走行位置直下から大きく外れると、微細なひび割れ等の影響で応答が出ない場合がある。例として、床版の入側、出側それぞれ車線に対して同じ位置で計測した波形を図-3.4.4 に示す。同じ車両が通過した際にも、床版の計測位置周りのひび割れ状況などの影響によって応答の大きさが大きく異なっていることがわかる。

したがって、写真-3.4.1(1)のようにいくつかの高感度ひずみゲージを 200mm 程度ずつ離して設置し、応答の大きさを確認しておくことで、感度のよい計測位置を円滑に選定することが必要である。

２）床版のひび割れ

写真-3.4.1(2)のように微細なひび割れに囲まれている場合は、ひび割れの状態にもよるが、ひび割れをまたいで設置する方が大きな応答が取得できる場合がある。

３）ハンチ

ハンチ部は床版が厚くなっているため応答が鈍い上、路面に対して斜めに位置しているため、応答が複雑になっている可能性がある。したがって、写真-3.4.1(3)のようにハンチは避けて設置するのが望ましい。

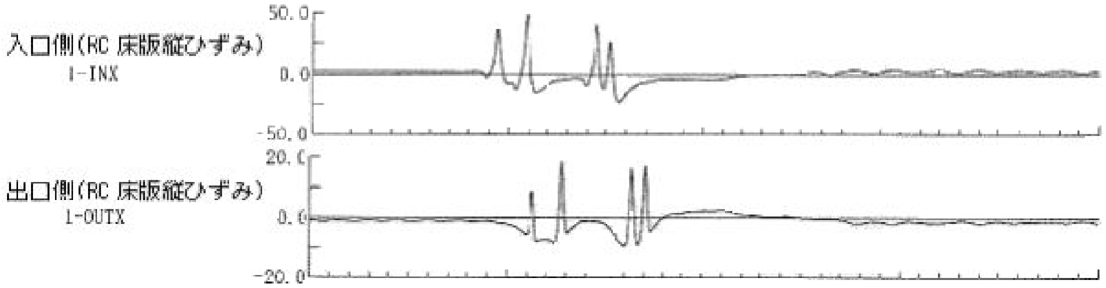
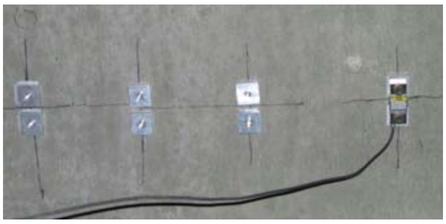
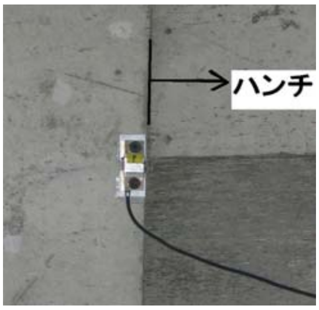


図-3.4.4　床版下面入側、出側のひずみ波形





(1)200mm ずつ離して設置　　(2)ひび割れをまたいで設置　　(3)ハンチを避けて設置

写真-3.4.1　高感度ひずみ計設置方法

４章．ＢＷＩＭシステムの活用

当システムを活用して、表-4.1.1 に示す場所で連続計測を行った。ここでは、その活用例を示す。

図-4.1.1　連続計測試験ケース

検証no.	橋梁条件						主桁計測位置	計測時間（h）
	橋梁名	支持条件	主桁	床版	斜角	車線		
1	福岡橋1回目	連続	鋼	RC	90°	片側2	L/2	6h
2	北陸橋	単純	鋼箱	RC	84°	片側1	L/2	6h
3	住吉川橋	単純	鋼	RC	74°	片側3	L/2	12h
4	岩屋高架橋	連続	PCT	RC（間詰め）	74°	片側3	L/2	12h
5	芦屋川橋	連続	鋼	RC	96°	片側3	L/2	12h
6	甲子橋	単純	鋼	RC	90°	片側2	L/4	72h
7	小山高架橋	連続	鋼	RC	90°	片側2	0.4L	72h
8	蓮沼橋	単純	鋼	RC	60°	片側2	L/2	72h
9	福岡橋2回目	連続	鋼	RC	90°	片側2	0.4L	72h

当システムでは重量算出結果について次の項目で自動集計される。集計画面の一例を図-4.1.1、図-4.1.2 に示す。

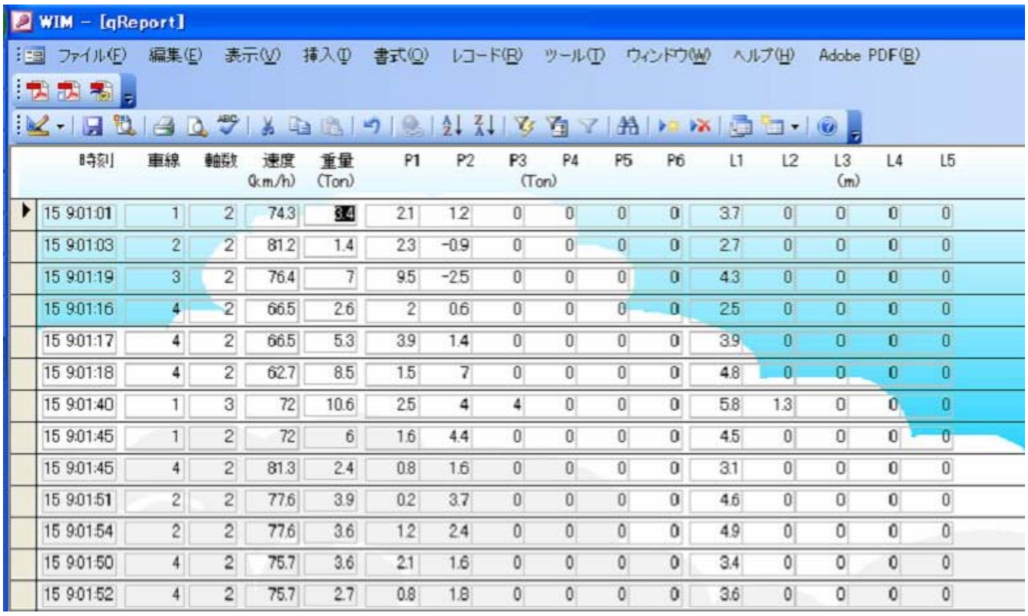
＜自動集計結果＞

- 台数集計 ── 台数集計　：全走行車両の合計台数表示
  - 台数集計(時間別)　：全走行車両の時間別合計台数表示
- 全車両リスト　：全車両のリスト
- 車両リスト(～ 20)　：20t 未満の車両リスト
- 車両リスト(20 ～ 30)　：20t 以上 30t 未満の車両リスト
- 車両リスト(30 ～ 40)　：30t 以上 40t 未満の車両リスト
- 車両リスト(40 ～)　：40t 以上の車両リスト

範囲1	範囲2	台数
0	20	0
20	30	0
30	40	0
40	999	0
0	0	0

図-4.1.1　台数集計画面の例

図-4.2.2　車両リスト画面の例



時刻	車線	軸数	速度 (km/h)	重量 (Ton)	P1	P2	P3 (Ton)	P4	P5	P6	L1	L2	L3 (m)	L4	L5
15 9:01:01	1	2	74.3	3.4	2.1	1.2	0	0	0	0	3.7	0	0	0	0
15 9:01:03	2	2	81.2	1.4	2.3	-0.9	0	0	0	0	2.7	0	0	0	0
15 9:01:19	3	2	76.4	7	9.5	-2.5	0	0	0	0	4.3	0	0	0	0
15 9:01:16	4	2	66.5	2.6	2	0.6	0	0	0	0	2.5	0	0	0	0
15 9:01:17	4	2	66.5	5.3	3.9	1.4	0	0	0	0	3.9	0	0	0	0
15 9:01:18	4	2	62.7	8.5	1.5	7	0	0	0	0	4.8	0	0	0	0
15 9:01:40	1	3	72	10.6	2.5	4	4	0	0	0	5.8	1.3	0	0	0
15 9:01:45	1	2	72	6	1.6	4.4	0	0	0	0	4.5	0	0	0	0
15 9:01:45	4	2	81.3	2.4	0.8	1.6	0	0	0	0	3.1	0	0	0	0
15 9:01:51	2	2	77.6	3.9	0.2	3.7	0	0	0	0	4.6	0	0	0	0
15 9:01:54	2	2	77.6	3.6	1.2	2.4	0	0	0	0	4.9	0	0	0	0
15 9:01:50	4	2	75.7	3.6	2.1	1.6	0	0	0	0	3.4	0	0	0	0
15 9:01:52	4	2	75.7	2.7	0.8	1.8	0	0	0	0	3.6	0	0	0	0

4.1　台数集計

台数集計において自動集計されるデータを用いた分析例を、検証 no.1 ～ 5 について示す。

（1）福岡橋

表-4.2.1　台数集計

車線	重量	軸数	時刻(h)						合計
			09～10	10～11	11～12	12～13	13～14	14～15	
1	0≦重量<20	2	40	45	43	33	46	31	240
		3	12	20	14	18	15	13	95
		4	1	1	3	2	1		12
	20≦重量<30	2		1	2		4	3	12
		3	1	4	7	5	5	4	29
		4			3	1	6	1	15
	30≦重量<40	2	2		2				6
		3	4		1	3	3		14
		4		1		2	3	3	13
		5		1					6
	40≦重量	2			1				3
		3	2		1	2			8
		4			1	1	1	1	8
		5			1	3			9
		6				2		1	9
2	0≦重量<20	2	14	20	11	4	11	9	71
		3	5	3	6	5	4	3	29
		4		1					5
	20≦重量<30	2		2	2		1		7
		3		1	5	5	6	1	21
		4	1		1		1		7
	30≦重量<40	3					1		4
		4			1		2		7
	40≦重量	3	1						4

車線１：走行　車線２：追越

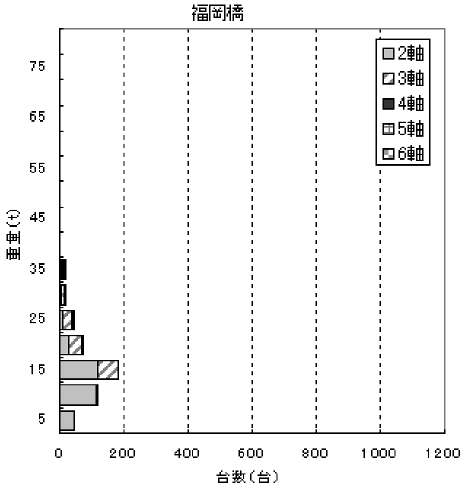


図-4.2.1　軸数ごとの車両重量頻度分布

（２）北陸橋

表-4.2.2　台数集計

車線	重量	軸数	時刻(h)						合計
			09～10	10～11	11～12	12～13	13～14	14～15	
1	0≦重量<20	2	13	16	6	9	7	10	61
		3		4	4		6		14
		5		1					1
	20≦重量<30	2	1	7	4	4	3	2	21
		3	15	6	9	3	7	26	66
		4		1					1
	30≦重量<40	2	3	3	4	1			11
		3	3	1	6	3	2	6	21
		4	1		2		2	2	7
	40≦重量	2				2	1		3
		3	3	7	2	2	1	3	18
		5				1			1
2	0≦重量<20	2	39	32	51	29	43	34	228
		3	22	16	24	22	25	19	128
		4	1	5	3	4	3	4	20
		5				1			1
	20≦重量<30	2	1		3	6	2	1	13
		3	4	3	2	3	3	4	19
		4	1					1	2
	30≦重量<40	2		1	2	1		1	5
		3		1	1			1	3
		4		1		2	2	3	8
		5			1				1
	40≦重量	2		1			1	1	3
		3				1		1	2
		4						1	1
	エラー	2		5	3	3	5	2	18
		3		1	3	1			5
		4		1					1

車線１：走行　　　車線２：追越

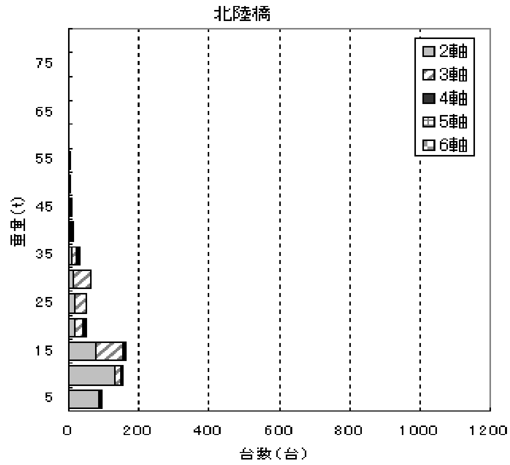


図-4.2.2　軸数ごとの車両重量頻度分布

（3） 住吉川橋

表-4.2.3　台数集計

車線	重量	時刻 (h)													合計
		21～22	22～23	23～24	0～1	1～2	2～3	3～4	4～5	5～6	6～7	7～8	8～9	9～10	
1	0≦重量<20	19	7							9	74	98	117	19	343
	20≦重量<30	8									13	20	6	2	49
	30≦重量<40	2									4	9	2		17
	40≦重量	2								1	3	7	1		14
	エラー	1									1	2	1		5
2	0≦重量<20	63	13				1			22	129	191	235	48	702
	20≦重量<30	13								6	27	29	19	4	98
	30≦重量<40	4									11	14	2	1	32
	40≦重量									1	2	8			11
	エラー	4									1	1			6
3	0≦重量<20	30	29	48	66	68	87	89	82	163	56	47	92	16	873
	エラー	4			1			5	3						13

車線１：走行　　　　　車線２：追越

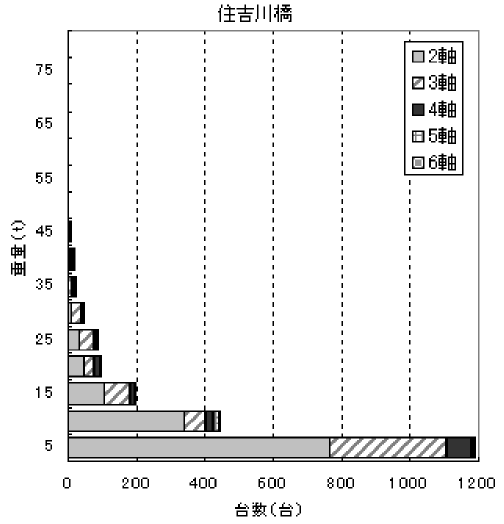


図-4.2.3 軸数ごとの車両重量頻度分布

（４） 岩屋高架橋

表-4.2.4　台数集計

車線	重量	時刻 (h) 21～22	22～23	23～24	0～1	1～2	2～3	3～4	4～5	5～6	6～7	7～8	8～9	9～10	合計
1	0≦重量<20	10	4	3	4	6	7	2	7	9	26	46	35	17	176
	20≦重量<30		1				2	1	4	4	5	3	3		23
	30≦重量<40						1	1	3	1		1			7
	40≦重量				1										1
	エラー	1	2										2		5
2	0≦重量<20	17	17	8	9	12	14	15	24	40	58	76	52	22	364
	20≦重量<30	5	4	7	6	6	9	7	7	24	7	7	3	2	94
	30≦重量<40	1	1		1	2	1	1	3	3	3		1		17
	40≦重量	1							2		1				4
3	0≦重量<20	9	7	17	22	25	27	33	32	30	28	36	72	18	356
	20≦重量<30	1	5	10	7	11	10	15	7	7	2	6	10	1	92
	30≦重量<40	2	1		1	1	2	1	4	3	2	2	1		20
	40≦重量	1	1												2
	エラー								1				1		2

車線１：走行　　　　　　車線２：追越

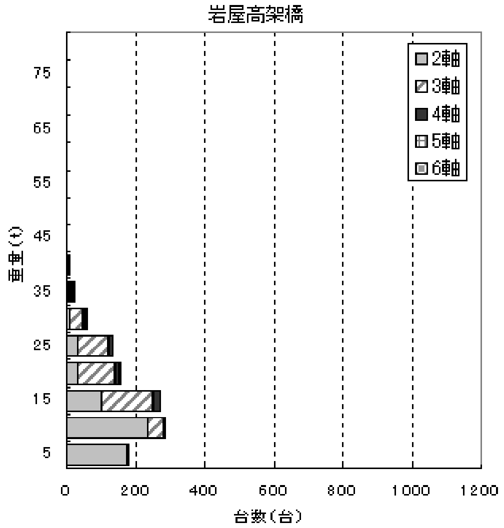


図-4.2.4　軸数ごとの車両重量頻度分布

（５） 芦屋川橋

表-4.2.5　台数集計

車線	重量	刻　（h）												合計
		21～22	22～23	23～24	0～1	1～2	2～3	3～4	4～5	5～6	6～7	7～8	8～9	
1	0≦重量<20	32	20	17	8	9	11	13	16	29	37	43	50	285
	20≦重量<30	14	5	5	1	6	2	7	9	17	30	31	16	143
	30≦重量<40	3	2	1	2	2	2	2	3	5	10	9	6	47
	40≦重量	1	3		2	1	3		2	1	9	6	1	29
	エラー									2			3	5
2	0≦重量<20	14	17	7	16	3	7	21	24	50	63	90	49	361
	20≦重量<30	5	2	1	2	2	2	9	3	6	18	15	16	81
	30≦重量<40		2	1		1			3	2	5	7		21
	40≦重量		1						1	2	2	8		14
	エラー										2		4	6
3	0≦重量<20	33	25	18	22	32	26	16	33	39	78	95	65	482
	20≦重量<30	9	12	14	23	21	20	22	27	39	35	33	27	282
	30≦重量<40	4	10	10	8	7	4	6	25	14	24	29	13	154
	40≦重量	7	6	6	6	5	8	5	14	19	27	20	10	133
	エラー		2							7		3	10	22

車線１：走行　　　　車線２：追越

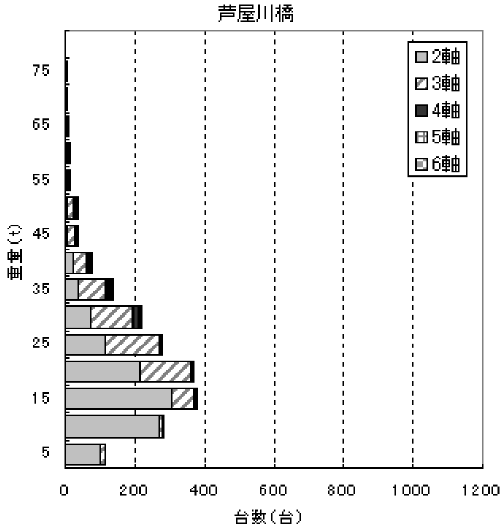


図-4.2.5　軸数ごとの車両重量頻度分布

4.2.2　全車両リスト

全車両リストからは、車両が通過した時刻、走行速度、軸数、軸重、総重量、軸間距離が分かる。検証 no.6 ～ 9 について、これらのデータを用いた分析例を以下に示す。

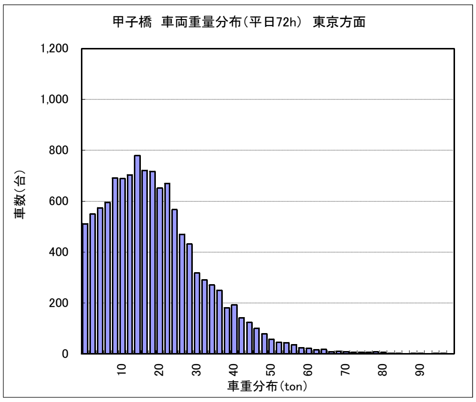
（1）甲子橋

表-4.2.6　台数集計

計測箇所	方向	車線	通過台数(平日72時間)						平均通過台数
			2軸車	3軸車	4軸車	5軸車	6軸車	合計	(台/日)
甲子橋(国道16号)	東京方面	走行	1,812	4,730	2,601	339	51	9,533	3,178
		追越	542	1,111	345	51	19	2,068	699
		合計	2,354	5,841	2,946	390	70	11,601	3,867
	館山方面	走行	1,616	2,579	1,129	129	18	5,471	1,824
		追越	2,260	2,002	512	41	8	4,823	1,608
		合計	3,876	4,581	1,641	170	26	10,294	3,431

①車両総重量分布（通過台数）

以下に車両重量分布を示す。東京方面は 14 ～ 16t 付近，館山方面は 12 ～ 14t，14 ～ 16t 付近にピークがあり、重交通路線であるといえる。



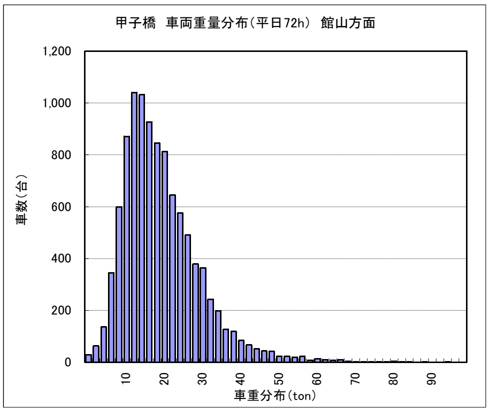


図-4.2.6　車両総重量分布(方向別)

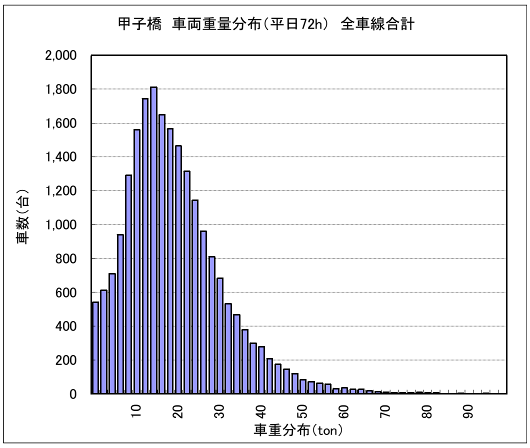


図-4.2.8　車両総重量分布（全車線合計）

②車両総重量分布(頻度)

各グラフの頻度の合計がそれぞれ 100 %になるように頻度分布に変換した。館山方面の計測結果では明確なピークを持つ分布が見られるが、東京方面の計測結果には明確なピークが見られず、ぼやけた分布となっている。

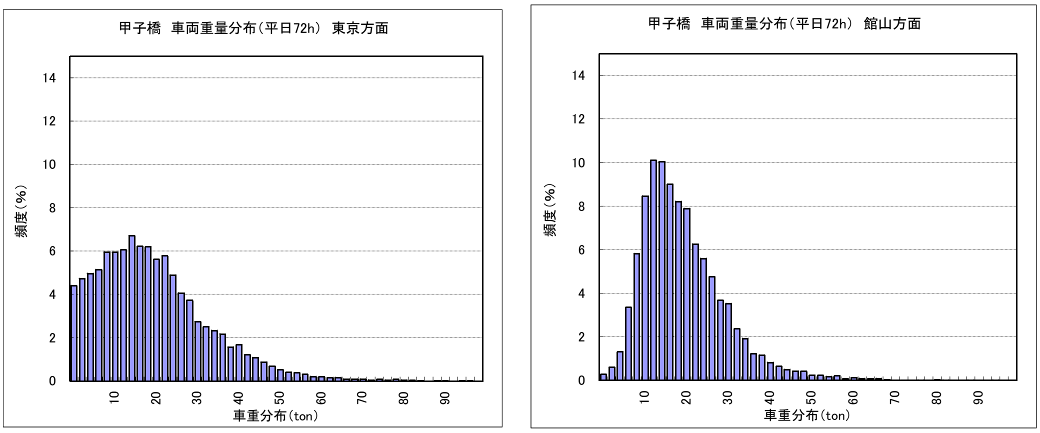


図-4.2.9　車両総重量分布(方向別)

③車両重量分布（軸種毎）

軸種毎に分類した車両重量分布を以下に示す。

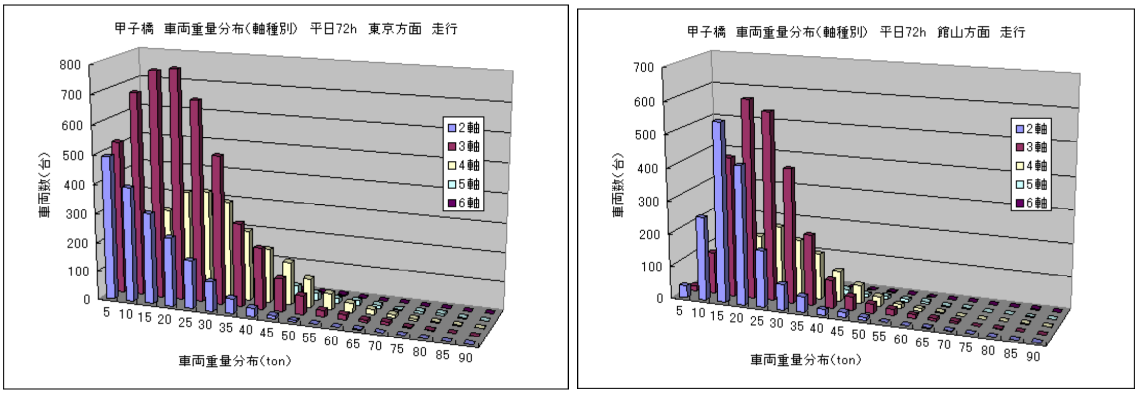


図-4.2.11　車両重量分布(方向別)

④時間別通過台数（軸種別）

３日間［1／20（火）12:00 ～１／23（金）12:00］の計測結果を以下に示す。

本システム上、渋滞時は車両重量計算を行うことが出来ない。計測結果より、３日間とも朝の６～１０時の間、その前後に対して少ない通過台数となっているが、これは朝のラッシュにより渋滞が発生し、通過車両を取りこぼしている結果であると推定出来る。

通過車両の軸種をみてみると、両方向とも３軸車以上の通過台数の占める割合が他の路線に比べ高いと考えられる。

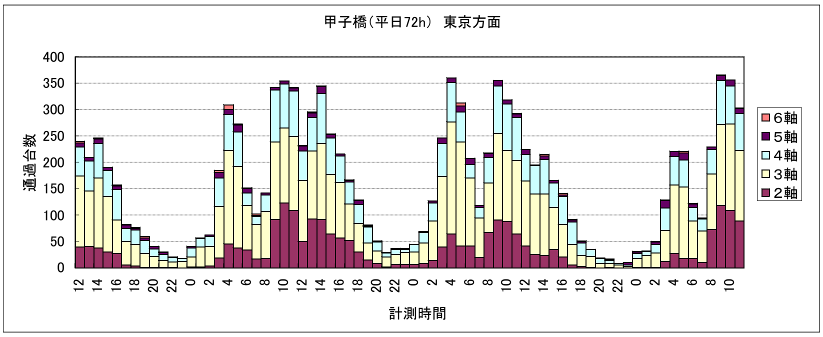


図-4.2.13　時間別通過台数(軸種別)　東京方面

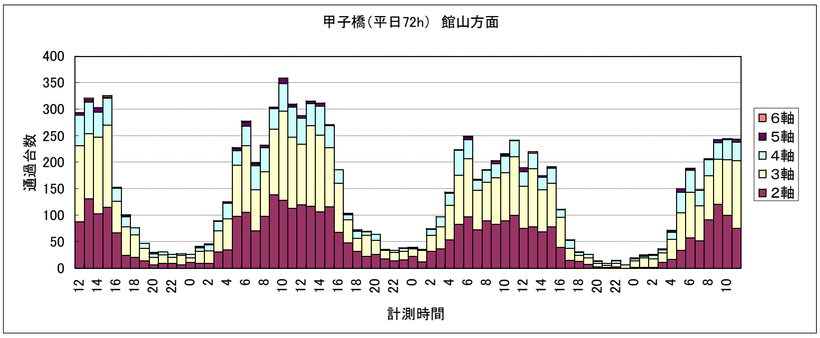


図-4.2.14　時間別通過台数(軸種別)　館山方面

⑤時間別通過台数（総重量別）

日中は 10t 以上の車両が数多く通過しているが、どちらの方向も夕方 17 時以降交通量が減少し、23 ～ 24 時辺りが最も少ない。朝方 3 時頃より再び交通量が日中並になっており、生活道路というよりは工業道路の性格の方が強い路線といえる。

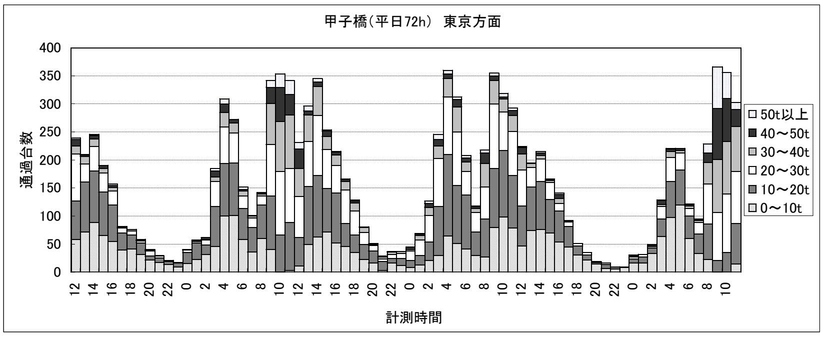


図-4.2.15　時間別通過台数（重量別）　東京方面

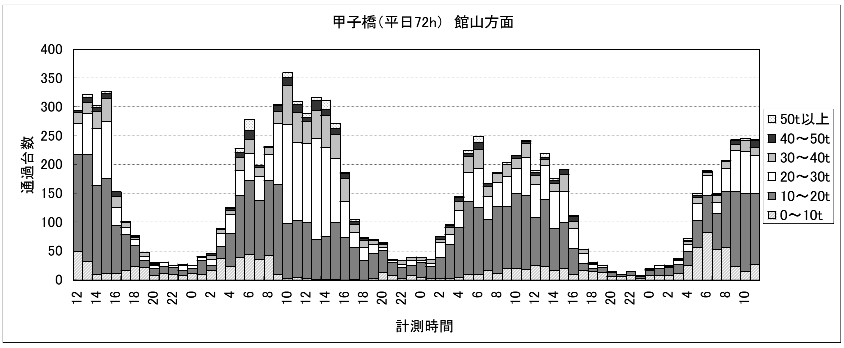
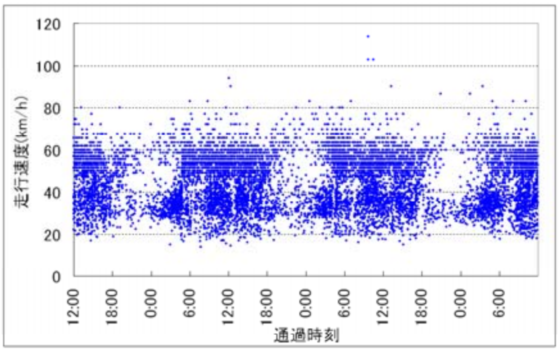


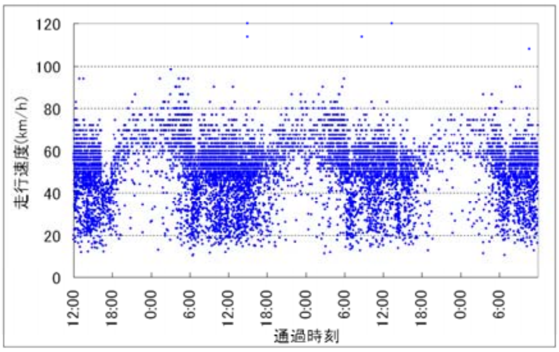
図-4.2.16　時間別通過台数（重量別）　館山方面

⑥時刻歴走行速度

通過した車両の走行速度を通過時間ごとにプロットしたものを図-4.2.17 及び図-4.2.18 に示す。両方向とも近くに信号があり、また交通量も多いことから時速 20 ～ 60km の比較的低い速度で走行している車が多い。



(a)　東京方面



(b)　館山方面

図-4.2.17　時刻歴走行速度

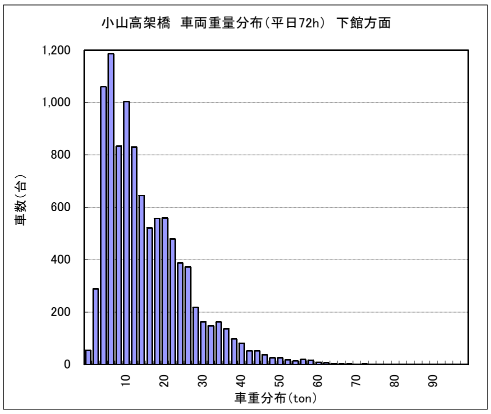
（2）　小山高架橋

表-4.2.7　台数集計

計測箇所	方向	車線	通過台数(平日72時間)						平均通過台数
			2軸車	3軸車	4軸車	5軸車	6軸車	合計	(台/日)
小山高架橋(国道50号)	下館方面	走行	3,274	2,654	1,037	278	20	7,263	2,421
		追越	1,624	935	229	14	2	2,804	935
		合計	4,898	3,589	1,266	292	22	10,067	3,356
	佐野藤岡IC方面	走行	2,448	2,693	509	65	24	5,739	1,913
		追越	1,946	1,950	313	44	3	4,256	1,419
		合計	4,394	4,643	822	109	27	9,995	3,332

①車両重量分布（通過台数）

小山高架橋における車両重量分布を以下に示す。両方向とも 6 ～ 10t の範囲（空車）および 20 ～ 26t の範囲（積載車）にピークを想定すると、下図に示す様なベル型の分布が推定出来る。



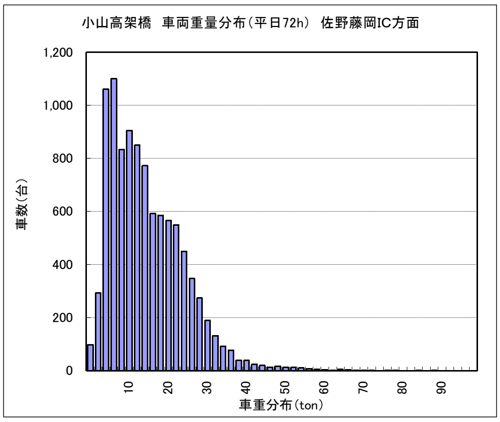


図-4.2.18　車両重量分布(方向別)

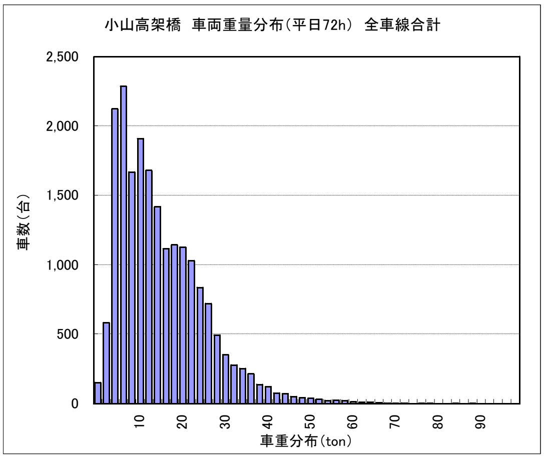
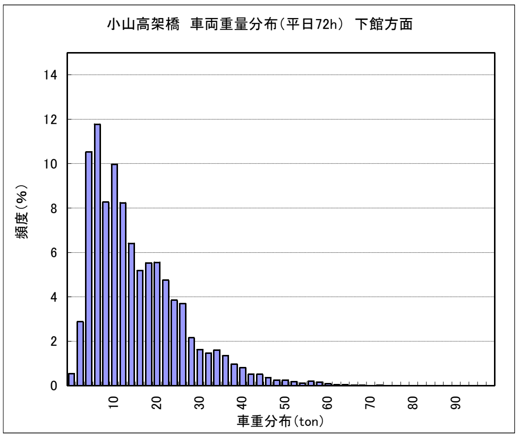


図-4.2.19　車両重量分布(全車線合計)

②頻度分布（車重別）

各グラフの頻度の合計がそれぞれ 100 %になるように頻度分布変換した。



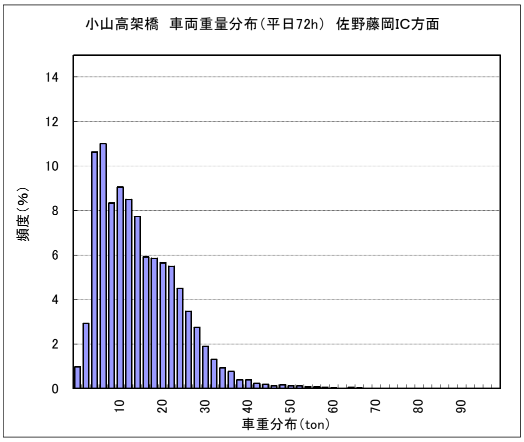


図-4.2.20　車両重量分布(方向別)

③車両重量分布（軸種毎）

軸種毎に分類した車両重量分布を以下に示す。

下館方面は、２軸車（２軸ダンプ，バス等），３軸車（３軸ダンプ，タンク車等），４～５軸車（セミトレーラ等）各種大型車が通過しており、各軸車の車重のピークは軸数が大きくなるにつれて大きくなる傾向にある。佐野藤岡ＩＣ方面においても同様の傾向がいえるが、５軸車以上の車両の通過は少ない。

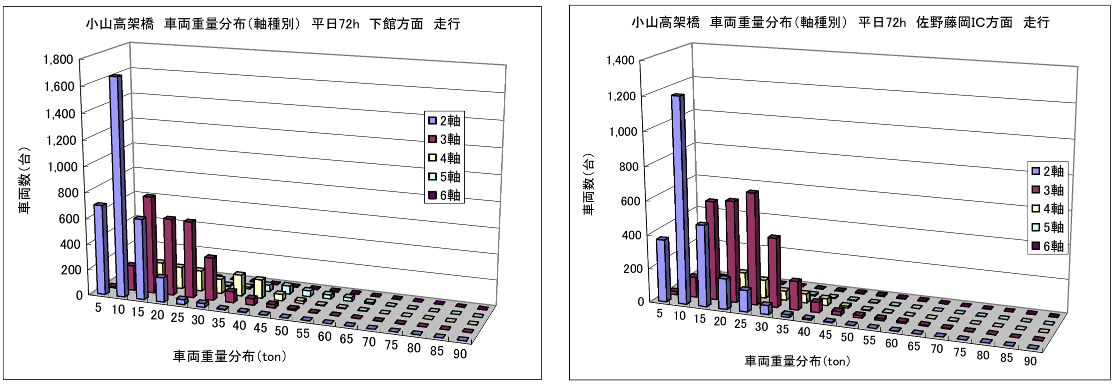
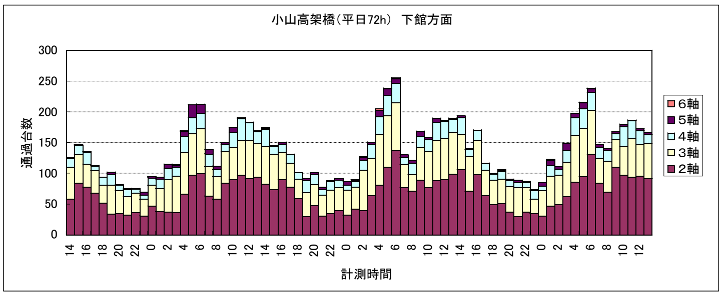


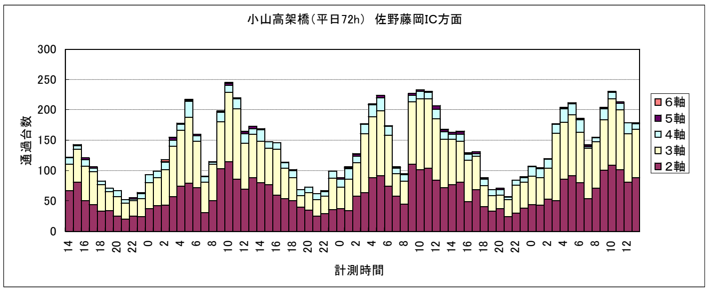
図-4.2.21　車両重量分布（方向別）

④時間別通過台数（軸種別）

両方向とも 1 日を通じて交通量が多く、深夜においても 1 時間あたり 50 台以上の大型車が通過している。



(a) 下館方面

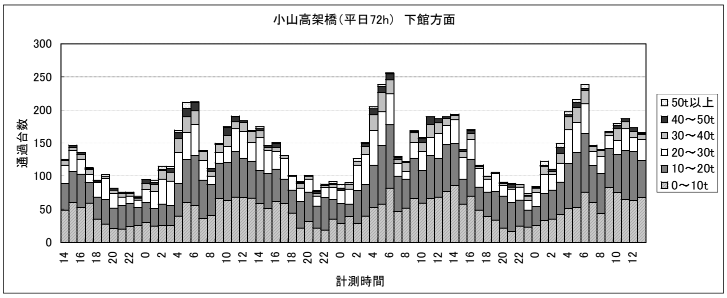


(b) 佐野藤岡IC方面

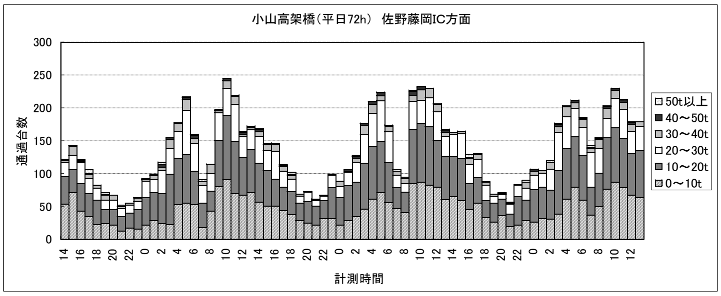
図-4.2.22　時間別通過台数（軸種別）

⑤時間別通過台数（総重重別）

下館方面では早朝４～７時付近に重量の大きい車両がかなり通過していることが分かる。



(a) 下館方面

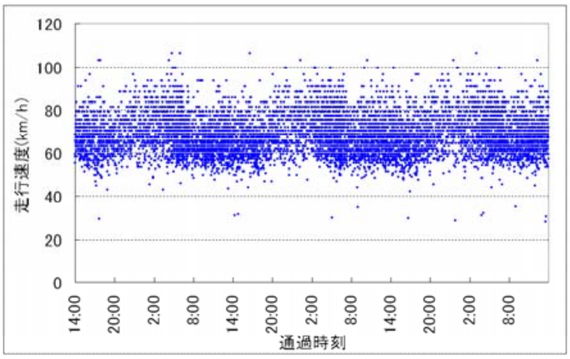


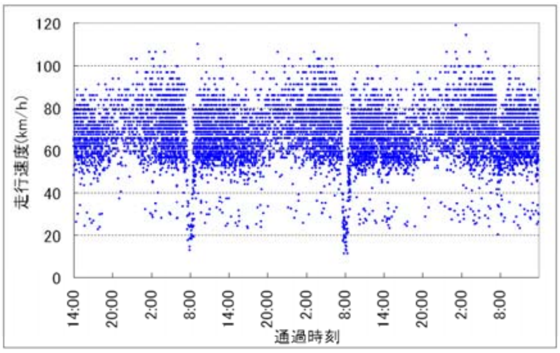
(b) 佐野藤岡IC方面

図-4.2.23　時間別通過台数(重量別)

⑥時刻歴走行速度

交差点や信号がないことから、60 ～ 80km/h とかなりの高速度で通過していることがわかる。また、佐野藤岡 IC 方面においては、朝 8 時前後に交通集中による渋滞があったことがわかる。





(a)　下館方面　　　　　　　　(b)　佐野藤岡IC方面

図-4.2.24　時刻歴走行速度

（3） 蓮沼橋

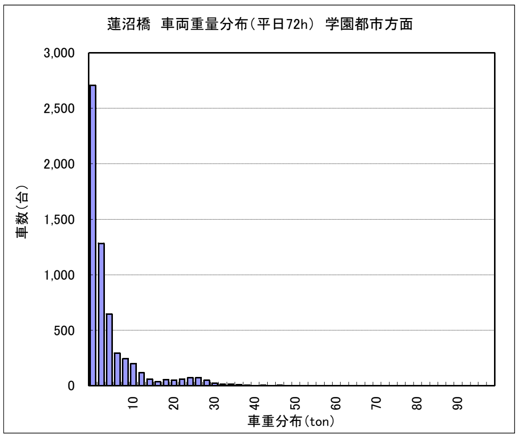
表-4.2.8 台数集計

計測箇所	方向	車線	通過台数(平日72時間)						平均通過台数
			2軸車	3軸車	4軸車	5軸車	6軸車	合計	(台/日)
蓮沼橋(国道400号)	学園都市方面	走行	2,843	237	64	10	1	3,155	1,052
		追越	2,348	498	40	10	0	2,896	965
		合計	5,191	735	104	20	1	6,051	2,017
	筑波山方面	走行	925	334	95	12	0	1,366	455
		追越	1,543	198	11	2	0	1,754	585
		合計	2,468	532	106	14	0	3,120	1,040

①車両重量分布（通過台数）

計測結果を以下に示す。

学園都市方面は車重 0 ～ 2t 辺りの車両が卓越しており、筑波山方面は車重 4 ～ 10t 辺りの車両が特に多い。



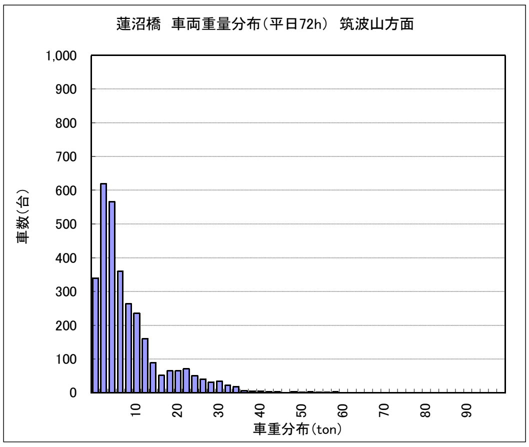


図-4.2.25　車両重量分布(方向別)

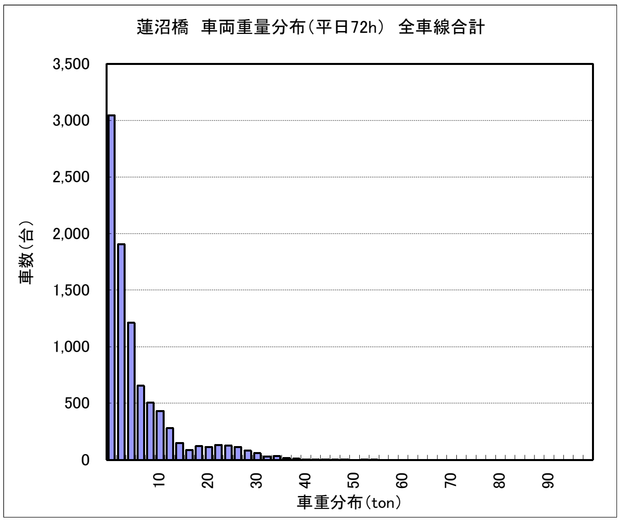
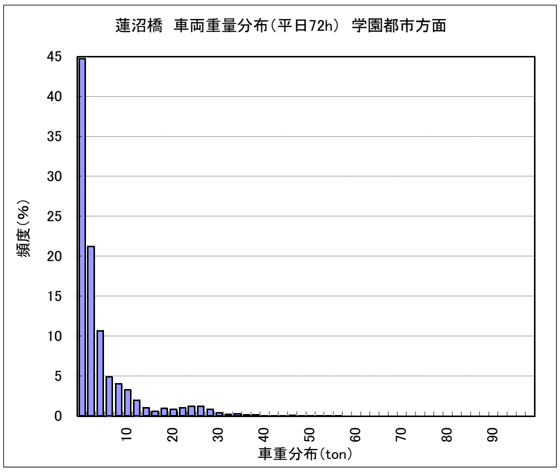


図-4.2.26　車両重量分布(全車線合計)

②頻度分布（車重別）

各グラフの頻度の合計がそれぞれ 100 %になるように頻度分布変換した。

学園都市方面は重量の軽い車両が卓越しているが、24 ～ 26t 辺りにかすかにではあるが、積載車のピークがみられる。また筑波山方面は 4 ～ 6t 辺りに空車のピークが存在し、22 ～ 26t 辺りに積載車のピークが明確に存在する。



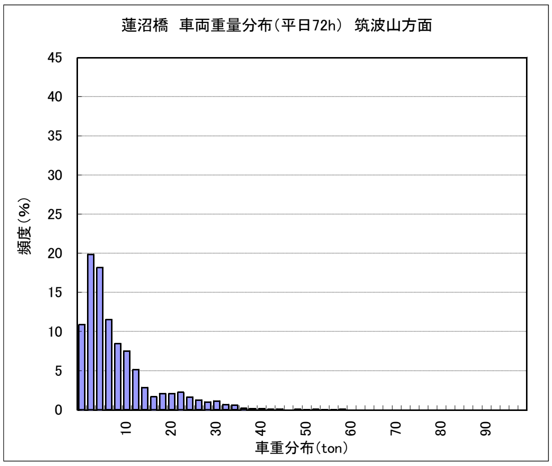
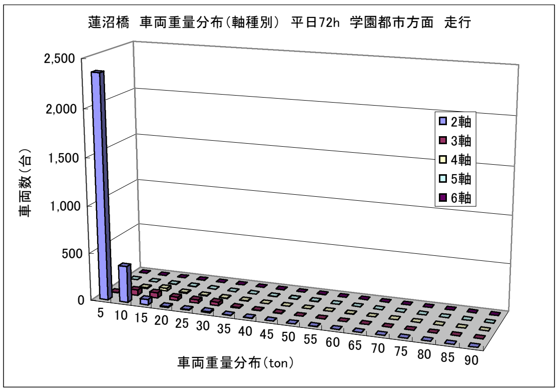


図-4.2.27 車両重量分布（方向別）

③車両重量分布（軸種毎）

軸種毎に分類した車両重量分布を以下に示す。

学園都市方面は通過車両のほとんどが２軸車であるが、筑波山方面は、２軸車だけではなく３軸車，わずかではあるが４軸車も走行している。



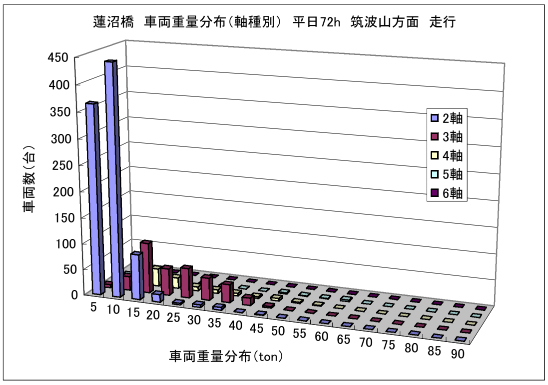
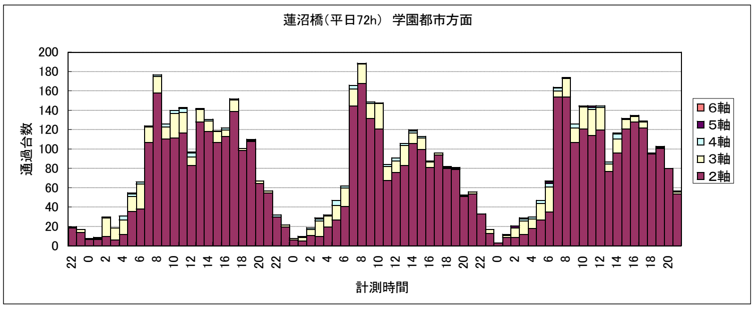
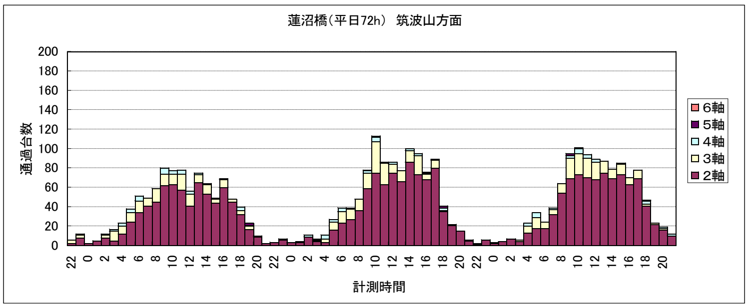


図-4.2.28 車両重量分布（方向別）

④時間別通過台数（重量別）



(a) 学園都市方面

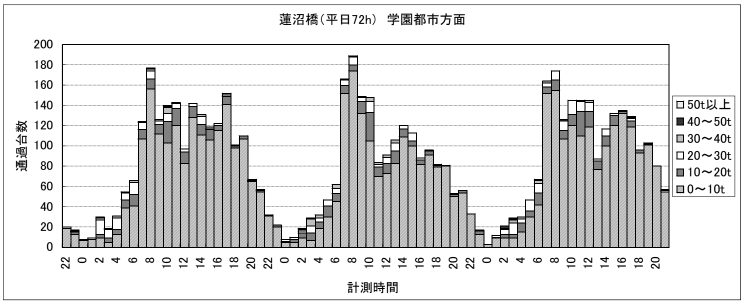


(b) 筑波山方面

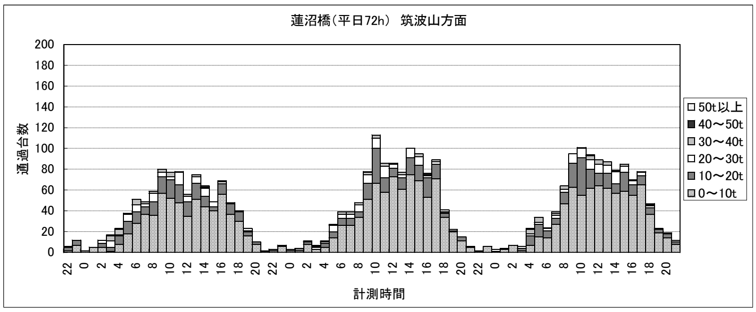
図-4.2.29　時間別通過台数(軸種別)

⑤時間別通過台数（総重重別）

計測結果を以下に示す。学園都市方面は、車重 10t 以下の車両が大半を占めているが、筑波山方面は 1 日を通じて車重 10t 以上の車もある程度走行している。



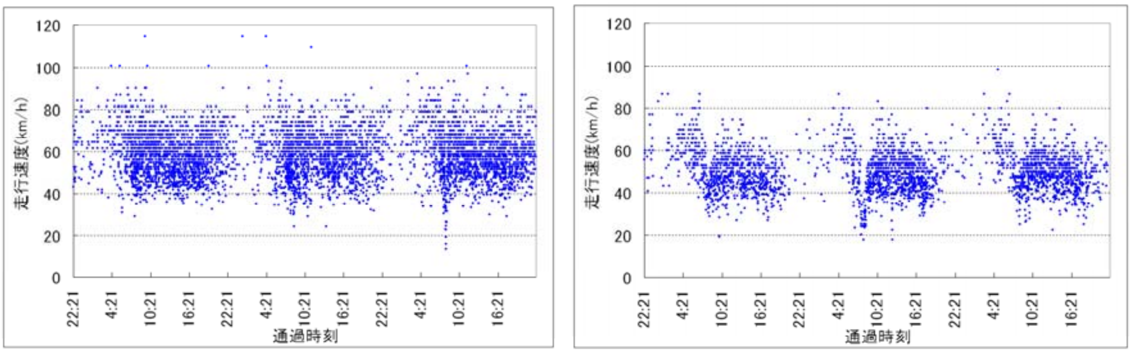
(a) 学園都市方面



(b) 筑波山方面

図-4.2.30　時間別通過台数(重量別)

⑥時刻歴走行速度



(a)　学園都市方面　　　　　(b)　筑波山方面

図-4.2.31　時刻歴走行速度

（４）　福岡橋２回目

表-4.2.9 台数集計

計測箇所	方向	車線	通過台数(平日72時間)						平均通過台数
			2軸車	3軸車	4軸車	5軸車	6軸車	合計	(台/日)
福岡橋(国道354号)	谷田部IC方面)	走行	1,540	1,202	517	47	13	3,319	1,106
		追越	1,334	632	240	10	0	2,216	739
		合計	2,874	1,834	757	57	13	5,535	1,845
	水海道方面	走行	2,118	1,307	673	56	28	4,182	1,394
		追越	1,228	794	349	27	0	2,398	819
		合計	3,346	2,101	1,022	83	28	6,580	2,213

①車両重量分布（通過台数）

計測結果を以下に示す。走行台数に若干の差はあるが、各方面とも類似した分布をしている。

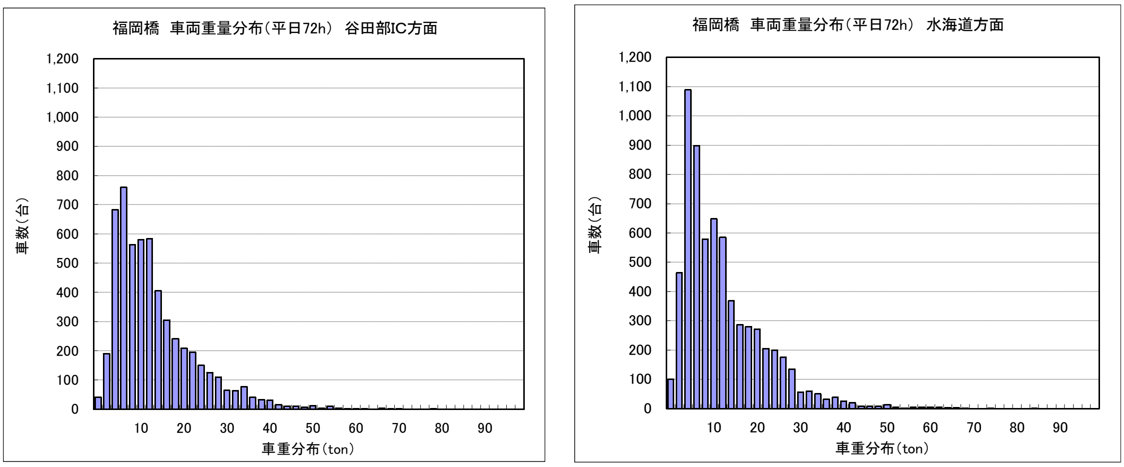


図-4.2.32　**車両重量分布（方向別）**

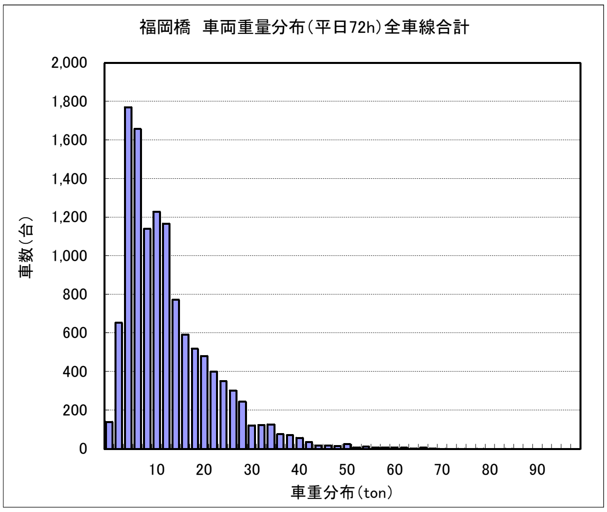
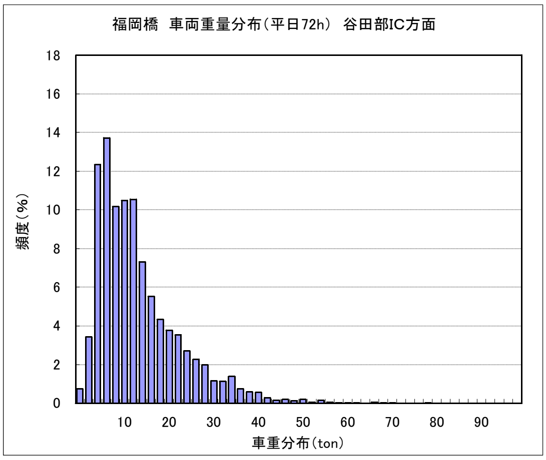


図-4.2.33　車両重量分布(全車線合計)

②頻度分布（車重別）

明確なピークではないが、両方面とも空車と積載車の２つのピークが混在していると推定出来る。



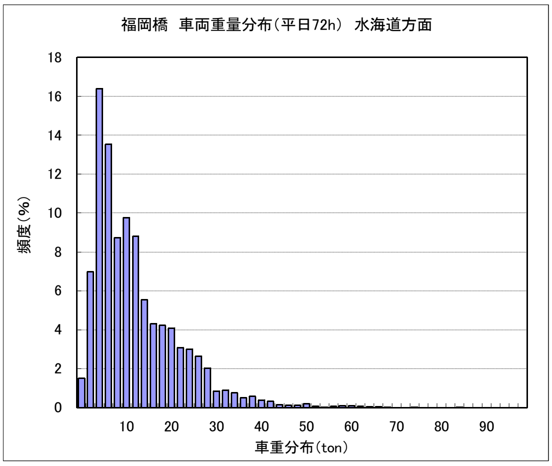
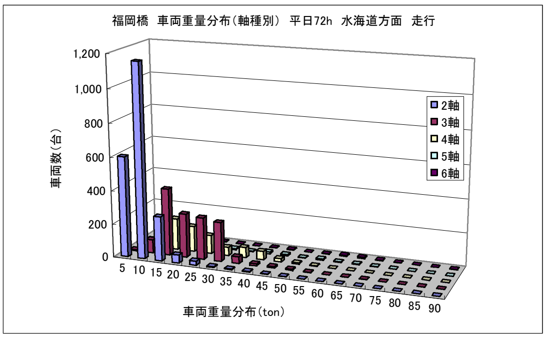


図-4.2.34　車両重量分布(方向別)

③車両重量分布（軸種毎）

軸種毎に分類した車両重量分布を以下に示す。両方面ともに、２軸車（２軸ダンプ，バス等），３軸車（３軸ダンプ，タンク車等），４軸車（セミトレーラ等）各種大型車が通過しており、各軸車の車重のピークは軸数が大きくなるにつれて大きくなる傾向にある。



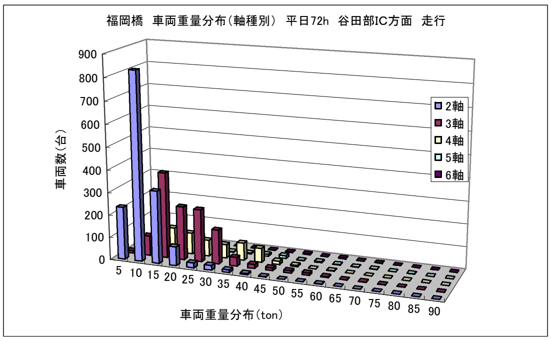
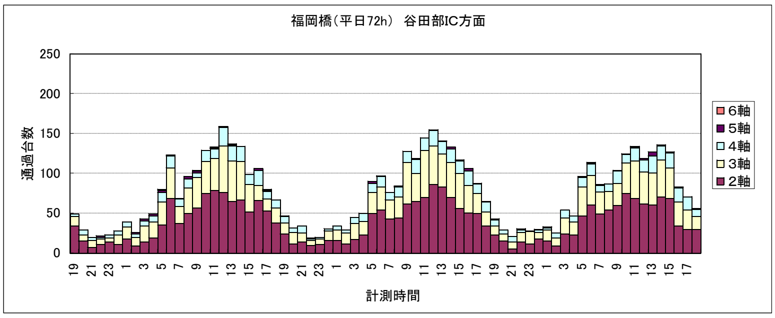
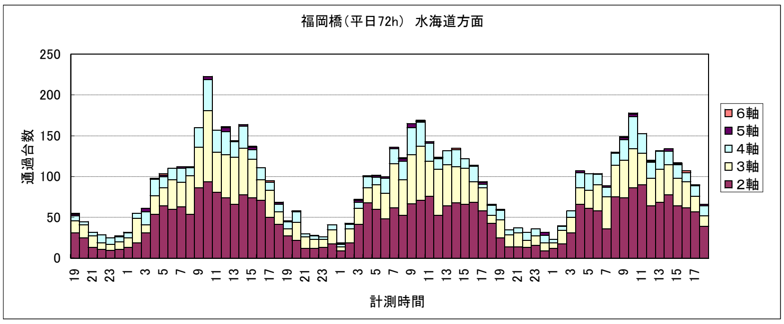


図-4.2.35　**車両重量分布（方向別）**

④時間別通過台数（車重別）



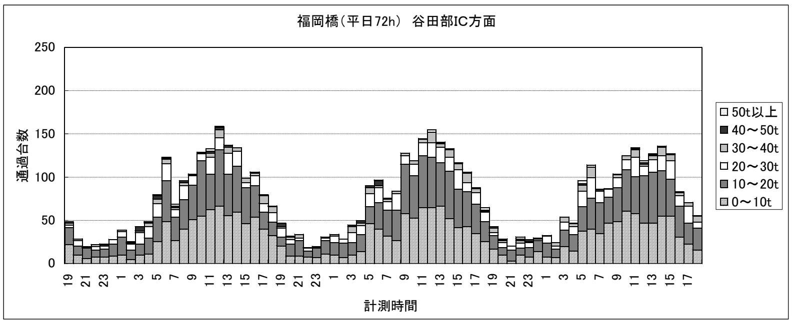
(a) 谷田部IC方面



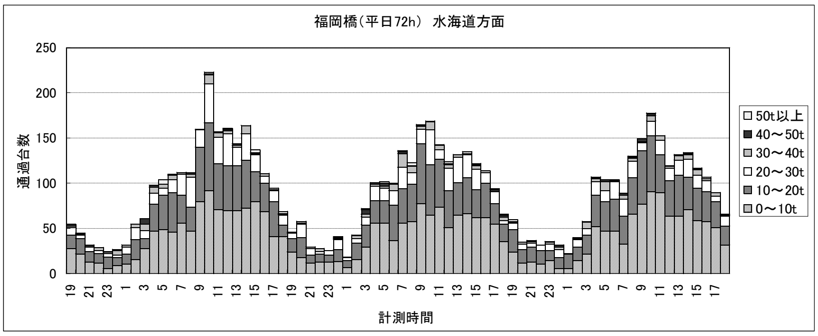
(b) 水海道方面

図-4.2.36　時間別通過台数(重量別)

⑤時間別通過台数（総重重別）



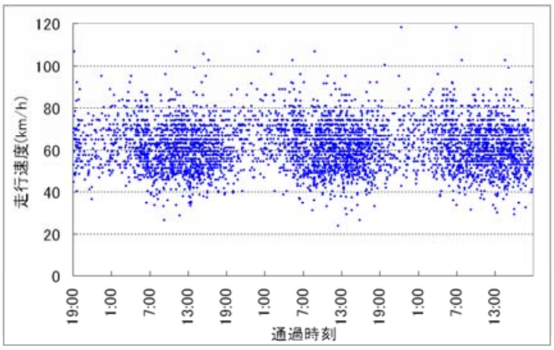
(a) 谷田部IC方面

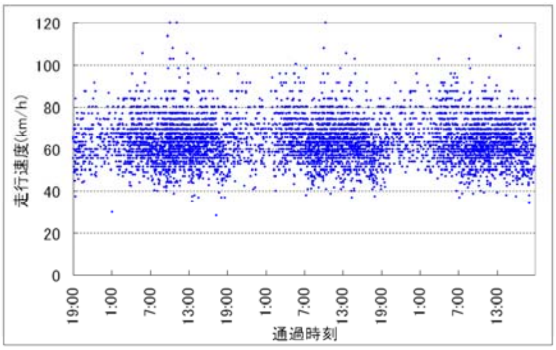


(b) 水海道方面

図-4.2.37　時間別通過台数(重量別)

⑥時刻歴走行速度





(a)　谷田部IC方面　　(b)　水海道方面

図-4.2.38　時刻歴走行速度

4.3　留意点

一般交通条件下における実測結果から得られた本システム適用上の留意点について以下に示す。

4.3.1 計測時のエラー

連続計測の中で、エラーを表示した件数を表-4.3.1 に、北陸橋におけるエラーの表示例を表-4.3.2 に示す。ここでいうエラーとは、総重量が負の値を算出したものをいう。

表-4.3.1 では各橋梁の算出データのうち３％エラーが生じる場合があることを表している。

表-4.3.1　実交通分析

橋梁	error(件数)	データ数	算出割合
福岡橋	0	634	100%
北陸橋	24	683	97%
住吉川橋	24	2163	99%
岩屋高架橋	7	1163	99%
芦屋川橋	33	2065	98%
合計	88	6708	98.7%

表-4.3.2　北陸橋におけるエラー表示の例(全車両リストより)

ID	mydate	時刻	shasen	vel	P_sig	重量	n_jiku	P1	P2	P3	L1	L2
308	2002/9/11 11:39	11～12	2	26.4	-5.7	エラー	3	-1.9	-1.9	-1.9	3.3	1.4
309	2002/9/11 11:39	11～12	2	29	11.1	0≦重量<20	2	77.5	-66.3	0	4.9	0
310	2002/9/11 11:40	11～12	1	32.6	30.6	30≦重量<40	2	-0.8	31.4	0	3.2	0
311	2002/9/11 11:40	11～12	2	37.7	25.1	20≦重量<30	2	58.5	-33.4	0	5.2	0

総重量において負の値を算出する原因としては、図-4.2.1 に示す計測波形より、交通量の多い橋梁などにおいて、橋梁上の他の車両の影響を受け、RC 床版下面で計測した波形に乱れが生じたためである。

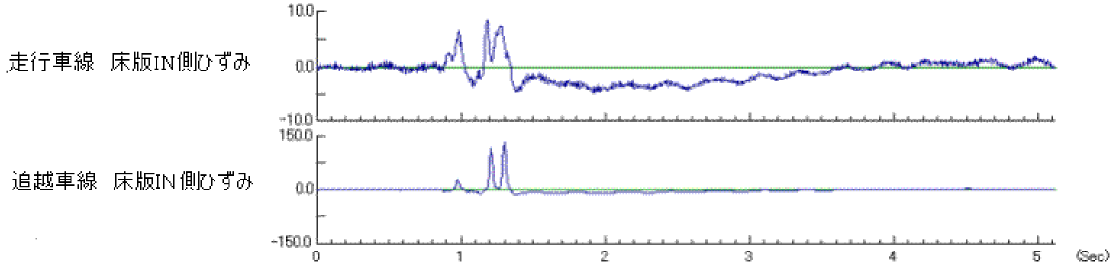


図-4.3.1　エラー生じた波形の例（RC 床版下面）

計測波形の乱れの原因として、他車線の影響が大きい位置に設置したことなどがあげられる。正確な計測を行うために、RC 床版下面に設置するひずみゲージは、以下の項目に留意して RC 床版のひずみゲージを貼り付けることに留意する必要がある。

→①同一床版内に複数車線の高感度ひずみ計を設置しないこと。

②可能な限り両サイドの車輪直下に高感度ひずみ計を設置すること。

その他の原因としては、計測時に設定した感度が良すぎるため、他車線の影響を大きく受けたことがあげられる。

しかし、感度の設定を下げすぎてしまうと、車両軸を取りこぼしてしまう可能性があるため、感度を設定する際には、細心の注意が必要である。

4.3.2 過大な車両

甲子橋（国道 16 号）において本計測における最大荷重車（車重 128.0ton，６軸）を計測した。計測波形を図-4.3.2 に示す。

本ケースでは、車両は単独走行しており、また実測ひずみと計算ひずみの影響線が類似していることから、計測ミス等ではなく実際に走行した車両であると考えられる。

また軸間距離より、形状が近いと思われるトレーラを図-4.3.3 に示す。

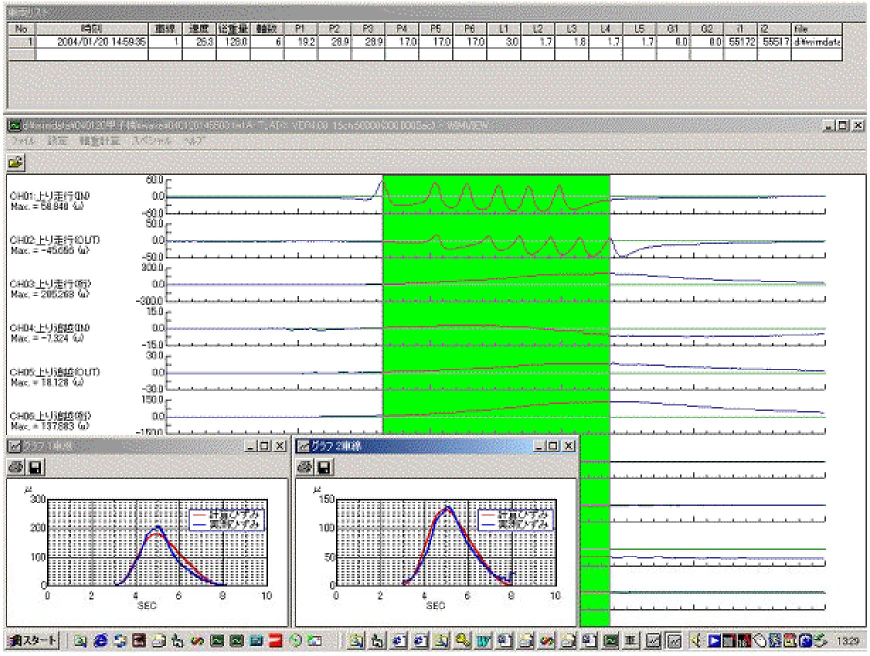


図-4.3.2　最大荷重車走行時の実測波形と計算結果

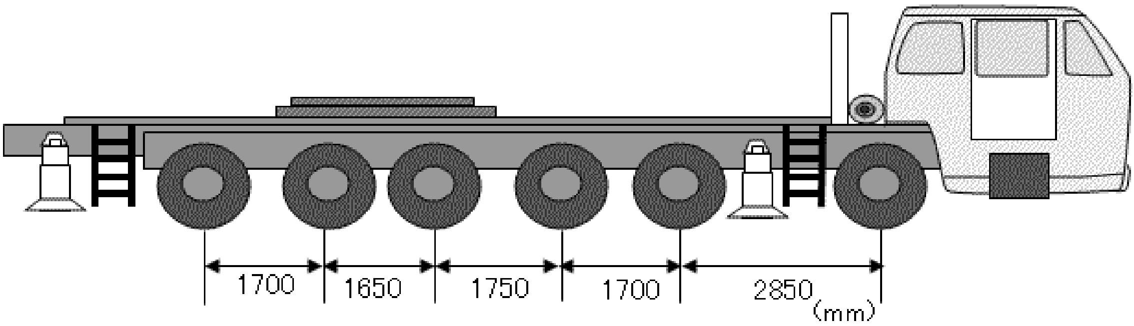


図-4.3.3 走行した最大荷重車に近いと推定されるクレーン用台車イメージ

５章　総括

本資料は、国土技術政策総合研究所道路研究部橋梁研究室が開発した車両重量計測システムのしくみ及び適用範囲についてとりまとめた。本報告書の要点は次の通りである。

①全ての計測を路下で行い、汎用的な機器で構成した BWIM を開発することで、計測行為が交通流に影響を与えることなく、できるだけ簡易にかつ妥当な経費で計測することが可能となった。

②橋梁の構造形式や損傷状態に応じて異なる部材応答の特性を把握し、車軸を判別可能な計測部材を選定した。

③通常走行時に得られた荷重列のデータを車両毎に分解する「車種判別アルゴリズム」を構築したことで、車種の特定が可能となり、車両ごとの重量の算出精度を向上させた。

④路面の凹凸による軸重値の変動や、走行位置の違いなどによって生じる重量算出誤差がなるべく少ない応答波形を得ることが可能な計測部材を選定した。

⑤試験橋梁や実橋を用いて､荷重車による走行試験および通常走行時における試験を行い、適用の範囲、精度を明確にした(表-5.1.1 適用条件)。

今後はこのシステムを用いて全国的に大型車の通行実態調査を行い、橋梁上を走行する交通特性ならびに橋梁各部の応答を把握する。さらに、道路橋の設計における自動車荷重に対する安全率の最適化など、設計の高度化に向けた設計活荷重の検討を行い、道路橋示方書をはじめとする各種設計基準への反映、ならびに橋梁の耐荷力、耐久性評価の検討に役立つ資料として反映させていく予定である。

表-5.1.1　適用条件

項目		推奨する条件	備考
橋梁諸元	単純・連続の別	単純	連続でも可能
	桁形式	鋼鈑げた形式	箱桁形式、PCT桁形式でも可能
	床版形式	コンクリート系床版	
	合成・非合成の別	任意	
	支間長	30～40m	対象径間に最大8台（全車線合計）の同時載荷まで。
	車線	最大4車線まで対応	
		計測区間で車線数が変化しないこと	
	斜角	直橋（斜角:90度）	斜角は許容されるが精度低下の原因となる。
	主げた	著しい変断面（径間内での桁高変化）がない	
交通条件	交通量	任意。ただし、計測区間への同時載荷8台以下	
	交通流	渋滞・停滞が生じないこと	著しく速度が（10km/h以下に)低下した状態では精度が著しく低下するか、計測不能となる。
		車線変更が頻繁に生じないこと	車線変更した車両およびその車両と同時に存在した車両は計測できない。
橋梁の状態	主げた	著しい錆等のない塗装げた	ひずみゲージによる計測に支障がないこと。（計測時塗装は除去が必要）
	床版	ひび割れや漏水は少ないほどよい	軸重に対応した波形が明瞭に計測できない可能性があり、車両の検知ができない。
		鋼板接着などによる補修がされていないこと	
	支承	著しい損傷を生じていないこと	車両載荷状態によって挙動が一定しない場合には精度低下の原因となる。
路面の状態	伸縮装置	車両進入側で著しい不連続となっていないこと	計測区間走行中の車両の激しい振動は精度低下の原因となる。
	舗装表面	著しい凹凸・段差を生じていないこと	
荷重車の条件	軸数	3軸車	
	重量	20ton程度	
その他	計測作業上の条件	床版下面へのゲージ貼付が可能であること	車両進入側の5m程度までの床版下面。
		主げた下面へのゲージ貼付が可能であること	径間中央付近の主げた。径間1/8地点までは可能。
		機器類の配線および配置が可能であること	

【参考文献】

1)中洲,中谷,玉越,石尾：橋梁を用いた車両重量計測システムの開発,土木技術資料 44-12
2)石尾,中谷,玉越,中洲：大型車の動的軸重と橋梁部材の応答に関する一考察,第 59 回年次学術講演会(2004 年 9 月)
3)石尾,中谷,玉越,中洲：多様な橋梁条件に対する WIM の適用性に関する調査,第 58 回年次学術講演会(2003 年 9 月)
4)石尾,中谷,玉越,中洲：影響線の重ね合わせを用いた WIM システムについて,第 57 回年次学術講演会(2002 年 9 月)
5)小塩,山田,小林,水野：鋼 I 桁橋の縦桁を用いた　BridgeWeigh-in-Motion システムの開発,構造工学論文集 vol.47A(2001 年 3 月)
6)三木,村越,米田,吉村：走行車両の重量測定,橋梁と基礎 87-4
7)三木,立石,高木：鋼床版縦リブ・横リブ交差部の応力実測とその分析,構造工学論文集 vol.37A(1991 年 3 月)
8)三木,水ノ上,小林：光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発,土木学会論文集 No.686/VI-52,31-40(2001 年 9 月)
9)松井,神原：道路橋の限界状態設計法に向けての活荷重に関する基礎的研究,構造工学論文集 vol.35A(1989 年 3 月)
10)Fred Moses：Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridges,Transportation Engineering Journal,ASCE vol.105,No.TE3(May 1979)
11)1999 年版車両緒元表　(社)自動車技術会

－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－
国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of ＮＩＬＩＭ
Ｎｏ. 188　　　　　　　　July 2004

編集・発行　国土技術政策総合研究所

－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－
本資料の転載・複写の問い合わせは
〒305-0804　茨城県つくば市旭一番地
企画部研究評価・推進課　PHONE 029-864-2674